

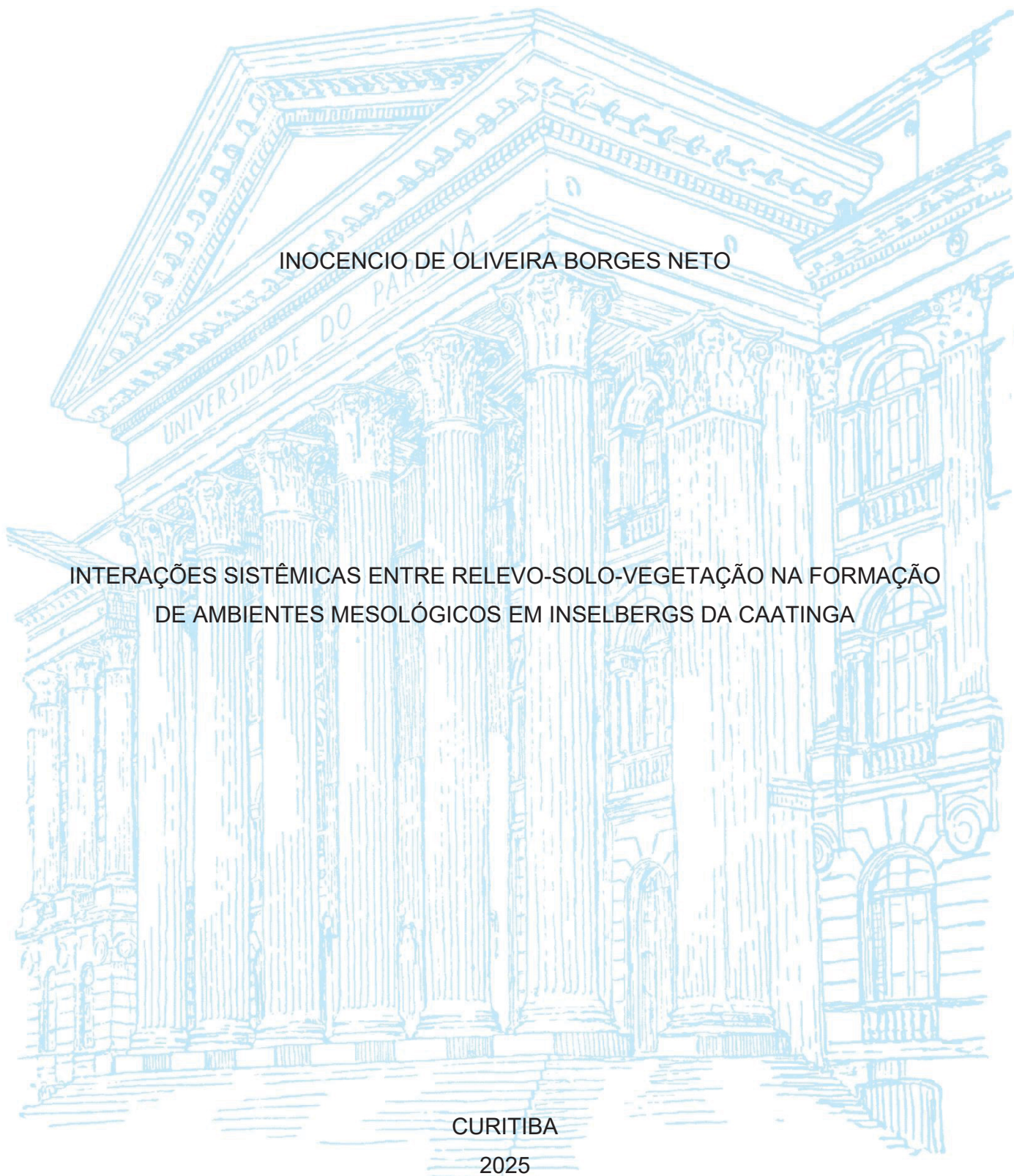
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

INOCENCIO DE OLIVEIRA BORGES NETO

INTERAÇÕES SISTÊMICAS ENTRE RELEVO-SOLO-VEGETAÇÃO NA FORMAÇÃO
DE AMBIENTES MESOLÓGICOS EM INSELBERGS DA CAATINGA

CURITIBA

2025



INOCENCIO DE OLIVEIRA BORGES NETO

INTERAÇÕES SISTÊMICAS ENTRE RELEVO-SOLO-VEGETAÇÃO NA FORMAÇÃO
DE AMBIENTES MESOLÓGICOS EM INSELBERGS DA CAATINGA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, no Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo José Cordeiro Santos
(interno)

Coorientador: Prof. Dr. José João Lelis Leal de Souza
(externo)

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Borges Neto, Inocencio de Oliveira

Interações sistêmicas entre relevo-solo-vegetação na formação de ambientes mesológicos em inselbergs da caatinga / Inocencio de Oliveira Borges Neto. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geografia.

Orientador: Leonardo José Cordeiro Santos

Coorientador: José João Lelis Leal de Souza

1. Inselbergs. 2. Formação do solo. 3. Isótopos estáveis. 4. Regiões semiáridas. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Geografia. III. Santos, Leonardo José Cordeiro. IV. Souza, José João Lelis Leal de. V. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOGRAFIA -
40001016035P1

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação GEOGRAFIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **INOCENCIO DE OLIVEIRA BORGES NETO**, intitulada: **INTERAÇÕES SISTÊMICAS ENTRE RELEVO-SOLO-VEGETAÇÃO NA FORMAÇÃO DE AMBIENTES MESOLÓGICOS EM INSELBERGS DA CAATINGA**, sob orientação do Prof. Dr. LEONARDO JOSÉ CORDEIRO SANTOS, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 29 de Abril de 2025.

Assinatura Eletrônica

14/05/2025 15:07:18.0

LEONARDO JOSÉ CORDEIRO SANTOS
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

14/05/2025 14:49:42.0

FABIO SOARES DE OLIVEIRA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS)

Assinatura Eletrônica

15/05/2025 13:52:46.0

ANTONIO CARLOS DE BARROS CORRÊA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO)

Assinatura Eletrônica

14/05/2025 17:56:02.0

RUBSON PINHEIRO MAIA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ)

Assinatura Eletrônica

14/05/2025 15:46:48.0

GUSTAVO SOUZA VALLADARES
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ)

Dedico este trabalho a todas as pessoas que acreditam na ciência, aos cientistas brasileiros, ao povo nordestino, aos caririzeiros paraibanos e a minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que é minha fonte de esperança e conforto nos momentos difíceis.

À toda minha família que sempre auxiliou com incentivo e apoio.

Ao meu Pai Vicente Borges Ramos, a minha Mãe M^a do Socorro Ramos Pereira, a minha Avó Alzira de Araújo Pereira e aos meus irmãos e irmãs, que são meus “pilares” na vida. Também aos meus tios e tias, aos meus primos e primas, aos meus padrinhos de batismo e de crisma.

Aos meus familiares (*in memoriam*), embora fisicamente ausentes, sentia sua presença ao meu lado, dando-me força e servindo de inspiração para superar os momentos mais difíceis.

Aos amigos que construí durante a vida, no qual destaco minha amiga (irmã de consideração e de coração) Valdeane Brito, por todo o apoio e incentivo em correr atrás dos meus sonhos.

À minha companheira M^a do Socorro Silva Salvador, por toda paciência, apoio e incentivo durante toda minha trajetória até aqui. Assim como sua família que sempre me ajudaram quando necessário.

Aos amigos dos grupos de WhatsApp: “Resenha Geográfica”, “Chupetinhas” e “Copa Ressaca”, que proporcionaram momentos de descontração e debates acalorados sobre Geografia, Política e Futebol.

Aos amigos que conheci através da minha jornada na Pós-Graduação, dos quais destaco: João Victor Amorin, Jônatas Silva, José Antônio Vilar e Matheus Figueiredo.

As pessoas que me recepcionaram em Curitiba-PR e Viçosa-MG. Em Curitiba, me senti confortável e muito abraçado por Teresinha Canestraro, popularmente conhecida como “Dona Sila” e toda sua família que me hospedou durante todos os momentos que estive por lá. Em Viçosa-MG, me senti da mesma forma, com a hospitalidade de Fernando. Agradeço-os pela atenção e acolhimento. Vocês fazem parte dessa história.

Meu agradecimento especial, ao meu amigo e orientador Dr. Leonardo José Cordeiro Santos (UFPR) que desde o momento em que entrei no doutorado, se mostrou interessado e animado, me incentivando, por meio de apoio moral e até financeiro nos

momentos em que mais precisei, por meio das conversas e trabalhos de campo, para o desenvolvimento desta pesquisa, e de outros estudos desenvolvidos ao longo da minha trajetória no doutorado, com o grupo de estudos: Laboratório de Biogeografia e Solos (LABS). Seu olhar holístico trouxe uma nova perspectiva para a organização e estruturação desta pesquisa, permitindo a ampliação dos horizontes a serem explorados. Meus dias em Curitiba-PR foram muito mais divertidos e prazerosos por nosso convívio.

Ao meu amigo e coorientador Dr. José João Lelis Leal de Souza (UFV) por todo o apoio no conhecimento pedológico, sendo responsável pela descrição, coleta e análises dos solos aqui estudados, por toda disponibilidade e atenção em me ajudar com orientações, direcionamentos e correções deste manuscrito. Além disso, foi responsável por me sugerir a Mobilidade Acadêmica para a UFV em 2024, sendo totalmente receptivo e muito atencioso sempre que necessário. Tal experiência foi umas das melhores e mais importantes em minha vida e essencial para minha projeção profissional.

Ao amigo e parceiro, Rafael Albuquerque Xavier (UEPB) por estar presente em praticamente toda a minha trajetória acadêmica, por todas as disciplinas, trabalhos de campo, eventos e discussões sobre melhorias das minhas pesquisas e por todos os incentivos morais e financeiros. Também pelas orientações em situações além da vida acadêmica. Se cheguei até aqui, isso passa por suas mãos, pois foi o primeiro que acreditou em meu potencial e se disponibilizou a ajudar desde 2014.

Ao amigo e parceiro de trabalho, Bartolomeu Israel de Souza (UFPB) que aceitou colaborar com esse trabalho, por todo conhecimento construído durante o desenvolvimento da pesquisa e por todos os incentivos morais e financeiros desde 2019, quando entrei no mestrado. Sua expertise em Biogeografia da Caatinga foi indispensável para execução dessa pesquisa.

Aos parceiros professores: Dra. Deborah Dick (UFRGS), Dr. Phillipe Cardoso (UERJ), Dra. Valéria Raquel Porto de Lima (UEPB) e Dr. Vinicius Seabra (UERJ) por contribuírem dentro de suas expertises para a construção deste manuscrito.

Aos professores: Dr. Antônio Carlos Barros Côrrea (UFPE), Dr. Fabio Oliveira (UFMG), Dr. Gustavo Valladares (UFPI) e Dr. Rubson Pinheiro Maia (UFC) por servirem

de referência e inspiração, e por aceitarem fazer parte desse momento ímpar, avaliando e contribuindo com este estudo.

Às equipes dos grupos de estudo ou laboratórios: Laboratório de Biogeografia e Solos (LABS-UFPR), Grupo de Estudos Geomorfológicos e Hidroecológicos de Ambientes Tropicais (GEGHAT-UEPB), Laboratório de Estudos do Semiárido (LAESA-UEPB) e Laboratório de Isótopos Estáveis (LIE-UFV) agradeço pela convivência enriquecedora e pela amizade cultivada. Em especial, agradeço aos amigos Aureliana Gomes, Alexei Nowatzki, Isabella Souza, Johana Masseran, José Oliveira, Marianne Oliveira e Rodrigo Souza do LABS, Elias Silva, Joyce Gomes e Marcos Dias (GEGHAT-UEPB), Eini Cardoso, Felipe Farias, Joel Cordeiro, Joseilson Medeiros, Lucas Ibraim e Ramon Souza (LAESA-UEPB), Daniela Costa, Humberto, João Milagres, Jônatas Silva e Maria Cardoso (LIE-UFV) fundamentais ao longo desta jornada. Agradeço a todos por compartilharem seus conhecimentos e experiências, tornando esta trajetória acadêmica ainda mais significativa.

Agradeço a todos (as) os (as) professores (as) do Programa de Pós-Graduação Geografia (PPGGEO), pelo conhecimento transmitido e por ampliar meus conhecimentos para além da visão acadêmica.

Ao governo do Brasil, à Universidade Federal do Paraná (UFPR) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudos no período 2021-2025, tornando possível a realização desta pesquisa.

Aos funcionários da UFPR, em especial o pessoal do Setor de Ciência da Terra e coordenação do PPGGEO, pela presteza e atendimento quando foi necessário.

Aos colegas e amigos(as) de Graduação e Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Paraná, pelos momentos de amizade e apoio ao longo de todo período em que estive resindindo em Curitiba-PR, dos quais destaco: Amanda Teodoro, Braien Gonçalves, Daniel Lange, Emerson Pawoski, Felipe Soek, Felipe Sugmacz, Karina Matos, Leonardo Brustolon, Luana Rudy, Marcelo Teodoro, Martina Klein, Natália Bauer, Rafaela Melissa, Thiago Leite, Vinícius Jorge, Willian Bortolini entre tantos outros.

Agradeço também aos que não foram citados, mas que de alguma forma contribuíram para a realização dessa tese.



Viver é adaptar-se.

Trecho da obra "Os Sertões" de Euclides da Cunha

RESUMO

Inselbergs, afloramentos rochosos graníticos isolados na Caatinga do Nordeste brasileiro, emergem como refúgios ecológicos em regiões semiáridas, modulando processos pedogenéticos e sustentando bolsões de solo essenciais à biodiversidade. Buscou-se compreender como seu arranjo topográfico complexo influencia a gênese dos solos, integrando revisão sistemática da literatura, análise dos processos pedogenéticos e avaliação da persistência da matéria orgânica do solo (MOS) no Campo de Inselbergs Graníticos (CIG) do Plúton Bravo, no Cariri paraibano. A revisão da literatura revelou que, globalmente, inselbergs atuam como refúgios ecológicos, preservando ambientes heterogêneos que abrigam biodiversidade especializada, embora fatores pedológicos permaneçam pouco explorados. No CIG, os solos dos bolsões mostraram-se ácidos, distróficos, com processos pedogenéticos mais desenvolvidos e teores de carbono orgânico (CO) até 5 vezes superiores aos típicos da Caatinga, com solos predominantemente eutróficos, rasos, incipientes e com baixos teores de CO, corroborados por assinaturas isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ que indicam condições úmidas durante a pedogênese, contrastando com o atual clima semiárido. A análise da matéria orgânica do solo (MOS) mostrou que, nos bolsões de solo do CIG, frações associadas aos minerais (MOAM) apresentam relativamente maior estabilidade, devido as associações organo-minerais e hidrofobicidade. No contexto da Caatinga típica, a aridez acelera a oxidação, favorecendo a formação de compostos aromáticos, mais resistentes. Assinaturas isotópicas de $\delta^{15}\text{N}$ sugerem fixação biológica de N_2 nos solos do CIG. Os resultados destacam que os inselbergs promovem uma maior diversificação pedológica e funcionam como reservatórios estratégicos de C, mitigando emissões de CO_2 em regiões secas. A preservação de sua vegetação nativa é indispensável para manter os mecanismos de persistência da MOS, reforçando sua atuação como refúgios ambientais. Por tanto, essa pesquisa avança na compreensão das interações entre geodiversidade e resiliência ecossistêmica, oferecendo subsídios para conservação e políticas de manejo sustentável em ambientes semiáridos, sobretudo frente aos cenários de mudanças climáticas e desertificação.

Palavras-chave: Inselbergs; pedogênese; matéria orgânica do solo; isótopos estáveis; refúgio ecológico; semiárido.

ABSTRACT

Inselbergs, isolated granitic rocky outcrops in the Caatinga of northeastern Brazil, function as ecological refuges in semiarid regions by modulating pedogenetic processes and supporting soil pockets critical to biodiversity. This study aimed to understand how their complex topographic arrangement influences soil genesis, combining a systematic literature review, analysis of pedogenetic processes, and evaluation of soil organic matter (SOM) persistence in the Granitic Inselberg Field (GIF) of Plúton Bravo, located in the Cariri region of Paraíba. The literature review indicated that inselbergs globally act as ecological refuges, preserving heterogeneous environments that harbor specialized biodiversity. However, pedological factors in these contexts remain underexplored. In the GIF, soil pockets were found to be acidic and dystrophic, with more advanced pedogenetic development and organic carbon (OC) levels up to five times higher than those in typical Caatinga soils. The latter are generally eutrophic, shallow, incipient, and low OC levels. Isotopic $\delta^{13}\text{C}$ signatures suggested humid conditions during soil formation, contrasting with the current semiarid climate. Analyses of soil organic matter (SOM) revealed that, within GIF soil pockets, mineral-associated organic matter (MAOM) fractions exhibit greater stability due to organo-mineral interactions and hydrophobicity. In contrast, Caatinga soils under aridity-driven oxidative conditions favored the accumulation of resistant aromatic compounds. Additionally, $\delta^{15}\text{N}$ isotopic signatures pointed to biological nitrogen fixation in GIF soils. The findings highlight that inselbergs enhance pedological diversification and serve as strategic carbon reservoirs, potentially mitigating CO_2 emissions in dry regions. Preserving their native vegetation is critical to maintaining SOM persistence mechanisms, reinforcing their role as environmental refuges. This study advances the understanding of geodiversity-ecosystem resilience interactions, providing insights for conservation and sustainable management policies in semiarid regions, particularly under climate change and desertification scenarios.

Keywords: Inselbergs; pedogenesis; soil organic matter; stable isotopes; ecological refuge; semiarid.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO. A) LOCALIZAÇÃO DO BIOMA CAATINGA E DO PLANALTO DA BORBOREMA; B) HIPSOMETRIA.....	26
FIGURA 2	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO. A) LOCALIZAÇÃO DO BIOMA CAATINGA E DO PLANALTO DA BORBOREMA; B) GEOLOGIA SIMPLIFICADA DO PLANALTO DA BORBOREMA.....	27
FIGURA 3	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	30
FIGURA 4	GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO EM ESCALA DE 1:100.000.....	31
FIGURA 5	HIPSOMETRIA DA ÁREA DE ESTUDO.....	32
FIGURA 6	DISTRIBUIÇÃO DOS PERFIS DE SOLO ANALISADOS (A E C). LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO (B).....	36
FIGURE 7	MICROHABITATS DIVERSIFICATION IN ROS ACCORDING TO THEIR GEOMORPHIC POSITION. SUMMIT CONDITIONS: CRACKS/FISSURES (A AND B) AND GNAMMAS (E – RED CIRCLE, AND F). SHOULDER, BACKSLOPE, AND FOOTSLOPE CONDITIONS: SHALLOW SOILS (C), CRACKS/FISSURES (B, D AND G) AND GNAMMAS (F – BLUE CIRCLE). TOESLOPE CONDITIONS (F – WHITE CIRCLE, AND H).....	40
FIGURE 8	FLOWCHART OF THE STUDY SELECTION PROCESS.....	43
FIGURE 9	DISTRIBUTION OF SELECTED STUDIES.....	46
FIGURE 10	CLOUD OF THE 50 MOST USED WORDS IN THE ARTICLES INCLUDED IN THIS REVIEW.....	48
FIGURE 11	OVERVIEW OF THE MAIN ENVIRONMENTAL VARIABLES USED IN THE SELECTED STUDIES.....	49
FIGURE 12	SIMPLIFIED HYPOTHETICAL SCHEME OF THE PHYSICAL-ENVIRONMENTAL DYNAMICS OF ROS IN HOT AND DRY CLIMATE ZONES.....	56
FIGURE 13	SUMMIT CONDITIONS.....	57
FIGURE 14	SHOULDER, BACKSLOPE AND FOOTSLOPE CONDITIONS.....	58
FIGURE 15	TOESLOPE CONDITIONS (ALLUVIUM-COLLUVIUM).....	58
FIGURE 16	STUDY AREA LOCATION AND DISTRIBUTION OF SOIL PROFILES ACCORDING TO RELIEF AND LITHOLOGY. TYPICAL CAATINGA SOILS ARE IN BLACK DOTS AND GIF SOILS ARE IN RED TRIANGLES.....	77
FIGURE 17	DISTRIBUTION OF GIF SOIL PROFILES ON SATELLITE IMAGE (A), SLOPE (B) AND ELEVATION (C).....	79

FIGURE 18	SCATTERPLOT OF $\delta^{13}\text{C}$ AND $\delta^{15}\text{N}$ VALUES. GREEN DOTS REPRESENT LITTER SAMPLES. BLACK DOTS REPRESENT SOIL SAMPLES.....	119
FIGURE 19	PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS CONSIDERING THE ENTIRE SAMPLE SET (A) AND THE GIF (B) AND TYPICAL CAATINGA (C) SOIL GROUPS SEPARATELY.....	121
FIGURE 20	SCHEMATIC MODEL OF SOIL GENESIS IN THE GRANITIC INSELBERG.....	123
FIGURE 21	VEGETATION COVER AND SOIL PROFILE IN GRANITIC INSELBERG FIELDS.....	124
FIGURA 22	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO (ESQUERDA) E DISTRIBUIÇÃO DOS PERFIS CONFORME A ALTITUDE (DIREITA).....	149
FIGURA 23	DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS CADEIAS CARBÔNICAS DAS AMOSTRAS DE MOAM E MOP NO CONTEXTO DOS SOLOS SITUADOS NO CIG E NA CAATINGA TÍPICA.....	161
FIGURA 24	DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DA COMPOSIÇÃO MOLECULAR DAS AMOSTRAS DE MOP NOS CONTEXTOS DO CIG (P1-P21) E DA CAATINGA TÍPICA (P23 E P28).....	163
FIGURA 25	DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DA COMPOSIÇÃO MOLECULAR DAS AMOSTRAS DE MOAM NOS CONTEXTOS DO CIG (P1-P21) E DA CAATINGA TÍPICA (P23 E P28).....	164
FIGURA 26	ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS INDICANDO A SEPARAÇÃO DOS GRUPOS DE SOLOS DE ACORDO COM A COMPOSIÇÃO BIOQUÍMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO, OS TEORES DE C E N E SUAS RESPECTIVAS ASSINATURAS ISOTÓPICAS DA FRAÇÃO MOP. Dim1 E Dim2: EIXO DIMENSIONAL.....	166
FIGURA 27	ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS INDICANDO A SEPARAÇÃO DOS GRUPOS DE SOLOS DE ACORDO COM A COMPOSIÇÃO BIOQUÍMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO, OS TEORES DE C E N E SUAS RESPECTIVAS ASSINATURAS ISOTÓPICAS DA FRAÇÃO MOAM. Dim1 E Dim2: EIXO DIMENSIONAL.....	167

LISTA DE TABELAS

TABLE 1	GENERAL CHARACTERISTICS OF THE STUDY AREAS.....	47
TABLE 2	GENERAL DESCRIPTION OF THE SITES.....	83
TABLE 3	MORPHOLOGICAL SOIL PROPERTIES.....	89
TABLE 4	PHYSICAL PROPERTIES. CS: COARSE SAND E FS: FINE SAND..	98
TABLE 5	CHEMICAL PROPERTIES.....	105
TABLE 6	TOTAL STOCKS OF ORGANIC C, TOTAL N AND BIOAVAILABLE P IN SOILS.....	114
TABELA 7	PRINCIPAIS PROPRIEDADES DE AMOSTRAS GLOBAIS (2 MM) DOS SOLOS ESTUDADOS.....	151
TABELA 8	TEORES DE C E N, RELAÇÃO C/N E ASSINATURAS ISOTÓPICAS DAS FRAÇÕES DE MOS.....	158

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Graus celsius
$\delta^{13}\text{C}$	Assinatura isotópica de ^{13}C
$\delta^{15}\text{N}$	Assinatura isotópica de ^{15}N
Al^{3+}	Alumínio trocável
BD	Bulk density
Bsh	Clima semiárido quente, caracterizado por baixa umidade, poucas chuvas e altas temperaturas
C	Carbono
C/N	Relação entre carbono e nitrogênio
C_3	Ciclo fotossintético de Calvin
C_4	Ciclo fotossintético de Hatch-Slack
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
Ca^{2+}	Cálcio trocável
CEC	Cation exchange capacity
CIE/UNESP	Centro de Isótopos Estáveis da Universidade Estadual Paulista
CIG	Campo de Inselbergs Graníticos
cm	Centímetro
cm^3	Centímetros cúbicos
$\text{cmol}_c/\text{dm}^3$	Centimol por decímetro cúbico
CO	Carbono orgânico
CO_2	Dióxido de carbono
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DCA/UFCG	Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande
DCM	Diclorometano
DEM	Digital Elevation Models
Dim	Eixo dimensional
dm^3	Decímetro cúbico
DPS-UFV	Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa
DTM	Digital Terrain Models
ECEC	Effective cation exchange capacity
Fe	Ferro
Fe^{3+}	Hidróxido de ferro
g	Grama
GC-MS	Gas chromatography-mass spectrometry

GEGHAT	Grupo de Estudos Geomorfológicos e Hidroecológicos de Ambientes Tropicais
GIF	Granitic inselbergs field
h	Hora
H + Al	Acidez potencial do solo
ha	Hectare
HTMA	Hidróxido de tetrametilamônio
HVG	Herbaceous vegetation in gnamma
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISNa	Índice de Saturação por Sódio
IUCN	International Union for Conservation of Nature and Natural Resources
IUSS-WRB	World Reference Base Soil Classification System
kg	Quilograma
km	Quilômetro
km ²	Quilômetros quadrados
K ⁺	Potássio trocável
m	Índice de Saturação por Alumínio
L	Litro
LABS	Laboratório de Biogeografia e Solos
LAESA	Laboratório de Estudos do Semiárido
m	Metro
m ²	Metros quadrados
MAM	Marcadores de atividade microbiana
MAOM	Mineral association organic matter
mg	Miligrama
mg/dm ³	Miligramas por decímetro cúbico
Mg	Megagrama
Mg ²⁺	Magnésio trocável
mm	Milímetros
MOAM	Matéria orgânica associada aos minerais
MOP	Matéria orgânica particulada
MOS	Matéria orgânica do solo
N ₂	Gás de Nitrogênio
N	Nitrogênio
Na ⁺	Sódio trocável
NaS	Sodium saturation index
NIST	Nacional Institute of Standards and Technology

OC	Organic carbon
P	Fósforo
PC	Principal Component
PCA	Principal Component Analysis
PD	Particle density
Pg	Pentagrama
PPGGEO/UFPR	Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Paraná
pH H ₂ O	Potencial hidrogeniônico em água
pH KCl	Potencial hidrogeniônico em cloreto de potássio
PLB	Planalto da Borborema
POM	Particulate organic matter
P _{REM}	Fósforo Remanescente
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analysis
PTFE	Politetrafluoretileno
RO	Rock outcrop
rpm	Rotação por minuto
SB	Sum of bases ou Soma de bases
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos
SOL-660	Disciplina de Matéria Orgânica do Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa
SOM	Soil organic matter
SWAFR	Southwest Australian Floristic Region
t	Capacidade de Troca Catiônica Efetiva
T	Capacidade de Troca Catiônica a pH 7.0
TMAH	Tetramethylammonium hydroxide
UEPB	Univesidade Estadual da Paraíba
UERJ	Univesidade Estadual do Rio de Janeiro
UFPB	Univesidade Federal da Paraíba
UFPR	Univesidade Federal do Paraná
UFRGS	Univesidade Federal do Rio Grande do Sul
UFV	Univesidade Federal de Viçosa
UV	Radiação ultravioleta
V	Índice de Saturação por Bases
WVB	Woody vegetation in the alluvium-colluvium found toeslope of the RO
WVG	Woody vegetation in gnamma

LISTA DE SÍMBOLOS

=	Igual
<	Menor
≤	Menor que ou igual
>	Maior
≥	Maior que ou igual
±	Mais ou menos
Δ	Delta: quarta letra do alfabeto grego maiúscula
δ	Delta: quarta letra do alfabeto grego minúscula
°	Graus
®	Representa uma marca registrada ou protegida por direitos autorais
μm	Micrómetro
μL	Microlitro
‰	Per mille que significa “por mil” ou “partes por mil”
%	Porcentagem
*	Asterisco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	ESTRUTURAÇÃO DA TESE.....	24
2	ÁREA DE ESTUDO.....	26
2.1	CONTEXTO REGIONAL.....	26
2.2	CAMPO DE INSELBERGS GRANÍTICOS DO PLÚTON BRAVO....	29
3	ARRANJO METODOLÓGICO.....	34
3.1	TRABALHOS DE CAMPO E OBTENÇÃO DE DADOS.....	34
3.2	PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS.....	37
4	RELAÇÕES SISTÊMICAS ENTRE RELEVO-SOLO-PLANTA EM AFLORAMENTOS ROCHOSOS.....	38
4.1	LITERATURE REVIEW OF RELIEF-SOIL-PLANT INTERACTION IN ROCK OUTCROPS.....	38
4.1.1	Abstract.....	38
4.1.2	Introduction.....	39
4.1.3	Methodology.....	42
4.1.3.1	Methodological arrangements of selected articles.....	44
4.1.3.2	Word cloud elaboration.....	45
4.1.4	Results.....	45
4.1.4.1	Overview.....	45
4.1.4.1.1	Word cloud.....	48
4.1.4.2	Methodological aspects.....	48
4.1.5	Description of the main results and interactions observed in the selected articles.....	50
4.1.6	Discussion.....	54
4.1.6.1	Water: the element that connects the (eco)system.....	54
4.1.6.2	Relief-soil-plant interactions at the RO interface.....	55
4.1.6.2.1	Synthesis of dynamics in ROs.....	59
4.1.6.3	ROs as refuges for biodiversity.....	59
4.1.6.4	Methodological aspects and knowledge limitations.....	61
4.1.6.5	Suggestions for future research/analysis.....	62
4.1.7	Conclusions.....	63

4.1.8	References.....	64
5	GÊNESE DE SOLOS DE BOLSÕES EM INSELBERGS NA CAATINGA.....	72
5.1	SOILS FORMED IN INSELBERGS HOST DROUGHT-SENSITIVE SPECIES IN THE BRAZILIAN SEMIARID.....	72
5.1.1	Abstract.....	72
5.1.2	Introduction.....	73
5.1.3	Materials and Methods.....	76
5.1.3.1	Study area.....	76
5.1.3.2	Soil sampling and analysis.....	80
5.1.3.3	Statistical analysis.....	81
5.1.4	Results.....	82
5.1.4.1	Soils in GIF.....	88
5.1.4.2	Typical soils in Caatinga.....	120
5.1.4.3	PCA analysis.....	120
5.1.5	Discussion.....	121
5.1.5.1	C, N, and P in dry forests.....	130
5.1.6	Conclusions.....	131
5.1.7	References.....	131
6.	MATÉRIA ORGÂNICA DOS SOLOS EM INSELBERGS NA CAATINGA.....	144
6.1	MECANISMOS DE PERSISTÊNCIA DA MATÉRIA ORGÂNICA DOS SOLOS DE BOLSÕES EM INSELBERGS NA CAATINGA.....	144
6.1.1	Resumo.....	144
6.1.2	Introdução.....	145
6.1.3	Materiais e Métodos.....	148
6.1.3.1	Área de estudo.....	148
6.1.3.2	Procedimentos metodológicos.....	150
6.1.3.2.1	Amostragem e principais propriedades dos solos.....	150
6.1.3.2.2	Fracionamento físico da MOS.....	153
6.1.3.2.3	Determinação dos teores de C e N e assinaturas isotópicas.....	154
6.1.3.2.4	Análise da composição bioquímica das frações da MOS.....	154
6.1.3.2.5	Análise estatística.....	156

6.1.4	Resultados.....	156
6.1.4.1	Teores de C, N, sua relação (C/N) e assinaturas isotópicas de C e N das frações de MOS.....	156
6.1.4.2	Composição bioquímica das frações de MOS.....	161
6.1.4.3	PCA.....	167
6.1.5	Discussão.....	167
6.1.5.1	Teores de C, N e relação C/N nas frações de MOS.....	167
6.1.5.2	Caracterização bioquímica das frações de MOS.....	170
6.1.5.3	Assinaturas isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ das frações de MOS.....	174
6.1.6	Considerações Finais.....	175
6.1.7	Referências.....	176
7	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	188
	REFERÊNCIAS GERAIS.....	190
	APÊNDICE A - BIBLIOMETRIC INFORMATION FROM THE LITERATURE REVIEW.....	218
	APÊNDICE B - LIST OF MAIN PLANT SPECIES IDENTIFIED IN THE SOIL PROFILE LOCATIONS.....	220
	APÊNDICE C - SOIL PROFILES AND LANDSCAPES.....	227
	APÊNDICE D – VEGETATION COVER AND SOIL PROFILE IN GRANITIC INSELBERG FIELDS.....	232
	APÊNDICE E - LISTA DE COMPOSTOS ORGÂNICOS CONFORME SUA FÓRMULA MOLECULAR E SUA RESPECTIVA CADEIA CARBÔNICA NAS FRAÇÕES MOP E MOAM.....	244

1. INTRODUÇÃO

Em regiões de predomínio climático variando do árido ao semiárido, como a Caatinga no Brasil, afloramentos rochosos denominados de “inselbergs”, são frequentemente observados nas suas paisagens geomorfológicas (Moro *et al.*, 2024; Souza *et al.*, 2023; Xavier, 2021). O termo “inselberg” – de origem alemã que significa “montanha-ilha” – foi criado pelo pesquisador Friedrich Wilhelm Conrad Eduard Bornhardt, em 1900, para descrever as abruptas elevações rochosas, isoladas, encontradas nas extensas planícies da Namíbia, África (Lima *et al.*, 2009). Segundo Bastos *et al.* (2021) essas feições são formadas por litologias mais resistentes ao intemperismo, geralmente oriunda de litologias graníticas e gnáissicas (Porembski; Barthlott, 2000), correspondendo a massas rochosas escarpadas, com morfologias côncavo-convexas, isoladas ou agrupadas, que afloram em superfícies erosivas (Migoñ, 2006; Rodrigues; Maia; Gomes, 2019).

No contexto da Caatinga, os inselbergs normalmente são sustentados por intrusões graníticas, que foram expostos pela erosão diferencial de antigas áreas orogênicas, e posteriormente retrabalhados por processos erosivos de distintos sistemas morfogenéticos oscilantes ao longo do Cenozoico (Corrêa *et al.*, 2010; CPRM, 2021; Maia *et al.*, 2015). Ao romperem a monotonia das paisagens aplainadas, dominante nas unidades geoambientais do Planalto da Borborema e da Superfície Rebaixada Sertaneja, os inselbergs contrastam o mosaico paisagístico, e transcendem para atuarem como refúgios da biodiversidade na Caatinga (Migoñ; Maia, 2020; Salvador *et al.*, 2023; Souza; Xavier; Borges Neto, 2024).

Comumente, são caracterizados como ambientes que passam por níveis muito elevados de estresse ambiental (Fitzsimons; Michael, 2017; Porembski; Barthlott, 2000). A associação entre fatores climáticos como, irregularidade pluviométrica, intensas oscilações de temperatura, elevada insolação, ventos fortes, escassez hídrica e altas taxas de evaporação reforça a ideia de que são ambientes xéricos (Burke, 2003b; Oliveira; Godoy, 2007; Silva, 2016; Vanschoenwinkel *et al.*, 2025). Tais condições determinam a distribuição das comunidades/espécies vegetais, a formação dos solos e

a ciclagem de nutrientes (Meyer *et al.*, 2021; Ottaviani; Marcantonio; Mucina, 2016; Pérez, 2023).

Sua maior elevação em relação a matriz superficial circundante, baixa porosidade e o complexo arranjo topográfico dos inselbergs, regem a captação e o escoamento da precipitação, sedimentos e resíduos orgânicos (Burke, 2002; Certini *et al.*, 2002). Por gravidade, esses elementos tendem a migrar e consequentemente preencher as áreas deprimidas dentro dos próprios corpos rochosos (gnammas, fraturas etc.) ou principalmente se acumular nas áreas do entorno dos inselbergs, constituindo ambientes deposicionais e de recarga hídrica (Letz *et al.*, 2021; Ottaviani; Marcantonio; Mucina, 2016; Yates *et al.*, 2019).

Esses ambientes, internacionalmente conhecidos como “bolsões de solo” (*soil pocktes*), favorecem a ocorrência de fragmentos florestais que chamam a atenção por sua altura, densidade e diversidade, contrastando com a cobertura vegetal encontrada na matriz paisagística predominante. De acordo com a literatura, estes bolsões de solo, em termos de dimensão, podem variar de apenas alguns centímetros a centenas de metros, padrão que se repete para outras regiões do globo, com características climáticas - quentes e secas - semelhantes às observadas na Caatinga, como por exemplo na Austrália (Clark-Ioannou; Wardell-Johnson; Millett, 2021; Ottaviani; Marcantonio; Mucina, 2016; Schut *et al.*, 2014; Yates *et al.*, 2019), no México (Bárcenas-Argüello *et al.*, 2010), e na Namíbia (Burke, 2001; 2002).

Apesar da importância que os solos exercem nessas áreas à manutenção de umidade, ciclagem de nutrientes e consequentemente colonização vegetal, a sua gênese ainda é pouco conhecida (Meyer *et al.*, 2021; Pérez, 2023).

Nesses ambientes, o solo é um recurso escasso e valioso (Certini *et al.*, 2002; Ottaviani; Marcantonio; Mucina, 2016), fundamental para a existência de refúgios que sustentam a biodiversidade (Fitzsimons; Michael, 2017; Keppel *et al.*, 2012; Zachos; Habel, 2011). Além disso, desempenha um papel essencial na adaptação às mudanças climáticas (Burke, 2003b; Schut *et al.*, 2014), na gestão dos recursos hídricos e na promoção de práticas sustentáveis de uso da terra (Lunguinho, 2018).

O solo contribui diretamente para a formação e manutenção dos ecossistemas nesses locais, oferecendo insights valiosos para sua conservação e manejo. Como um

verdadeiro “portador de informações”, ele resguarda a história ambiental, tornando-se um elemento essencial que exige atenção e cuidado (Bouma *et al.*, 2022).

Embora os solos desenvolvidos nos inselbergs sejam de grande importância, os estudos realizados até o momento têm seguido outras abordagens, tais como: a) o primeiro está relacionado a uma perspectiva ecológica, com ênfase na importância exercida pelos diferentes microhabitats existentes nessas feições, na constituição de microambientes altamente especializados ou raros (Porembski; Barthlott, 2000) que podem funcionar como refúgios de biodiversidade (Burke, 2003b; Porembski; Barthlott, 2000; Porembski, 2007); b) o segundo procura explicar a gênese e os processos geológico-geomorfológicos evolutivos multiescalares desses relevos (Maia; Nascimento, 2018; Matmon *et al.*, 2013; Migoñ, 2006; Twidale, 1982; 2002), e por fim, c) o terceiro visa a valorização (geo)patrimonial dessas áreas, sob uma ótica de utilização sustentável, articulando a geoconservação com serviços ecossistêmicos (Migoñ; Maia, 2020; Souza; Xavier; Borges Neto, 2024).

Assim, com base nessa perspectiva, surge o seguinte questionamento: como os inselbergs e os diversos ambientes a eles associados, influenciam a gênese e distribuição dos solos?

Os solos da Caatinga são geralmente incipientes, rasos, moderadamente ácidos a moderadamente alcalinos, eutróficos, secos, com baixos teores de carbono orgânico e menos desenvolvidos, quando comparados, por exemplo, aos solos das regiões tropicais úmidas do Brasil (Araújo Filho *et al.*, 2017; 2023; Galindo *et al.*, 2008). Em contrapartida, a hipótese aqui é de que os inselbergs exercem um papel fundamental na gênese dos solos, devido seu complexo arranjo topográfico, que influenciam fatores como a distribuição e retenção de água, sedimentos, nutrientes e resíduos orgânicos, a exposição solar, a topografia e a proteção contra a erosão. Essas características criam condições distintas na sua formação nos diferentes ambientes, resultando em uma variedade de classes de solo com propriedades únicas e distribuição espacial específica quando comparadas a gênese de solos típicos da Caatinga semiárida.

Para testar essa hipótese, esta pesquisa teve como objetivo geral compreender se as formas de relevo associadas aos inselbergs favorecem a existência de ambientes com condições mesológicas mais propícias ao desenvolvimento do solo e à manutenção de

vegetação sensível à escassez hídrica. Para isso, foram estabelecidos três objetivos específicos: i) realizar uma revisão sistemática da literatura sobre as relações entre relevo, solo e vegetação em afloramentos rochosos de ambientes áridos e semiáridos (quentes e secos); ii) investigar a gênese dos solos desenvolvidos nos inselbergs da área de estudo; iii) analisar os principais mecanismos de persistência da matéria orgânica do solo (MOS).

O Campo de Inselbergs Graníticos (CIG) na superfície do Plúton Bravo, situado no Cariri paraibano, Nordeste brasileiro, serviu de laboratório para a execução dessa pesquisa. Ressalta-se que a escolha dessa área foi baseada por ela reunir um conjunto significativo de inselbergs catalogados para compor o projeto Geoparque Cariri Paraibano (Lages *et al.*, 2018).

1.1 ESTRUTURAÇÃO DA TESE

A tese foi organizada em capítulos gerais e específicos. Os capítulos gerais 1, 2, 3 e 7, apresentam informações amplas e fundamentais sobre o tema estudado, situando problema de pesquisa dentro de um panorama mais amplo, enquanto os capítulos 4, 5 e 6 apresentam, em formato de artigo científico os resultados e discussões associados aos objetivos apresentados.

Quanto aos capítulos específicos, apresentam-se os seguintes:

- O capítulo 4 - RELAÇÕES SISTÊMICAS ENTRE RELEVO-SOLO-PLANTA EM AFLORAMENTOS ROCHOSOS, faz referência ao primeiro artigo publicado desta tese, no periódico *Sociedade & Natureza*, denominado de *Literature review of relief-soil-plant interaction in rock outcrops* (item 4.1). Este manuscrito de revisão apresenta um panorama global sobre as principais relações observadas entre relevo-solo-planta em afloramentos rochosos submetidos a condições climáticas quentes e secas;
- O capítulo 5 - GÊNESE DE SOLOS DE BOLSÕES EM INSELBERGS NA CAATINGA, refere-se ao artigo submetido e atualmente em processo de revisão no periódico *Pedosphere*, intitulado *Soils formed in inselbergs host drought-sensitive species in the Brazilian semiarid* (item 5.1). Este capítulo avança na

compreensão dos principais processos pedogenéticos identificados nos solos situados em bolsões nos inselbergs na Caatinga e seu significado para a evolução da paisagem;

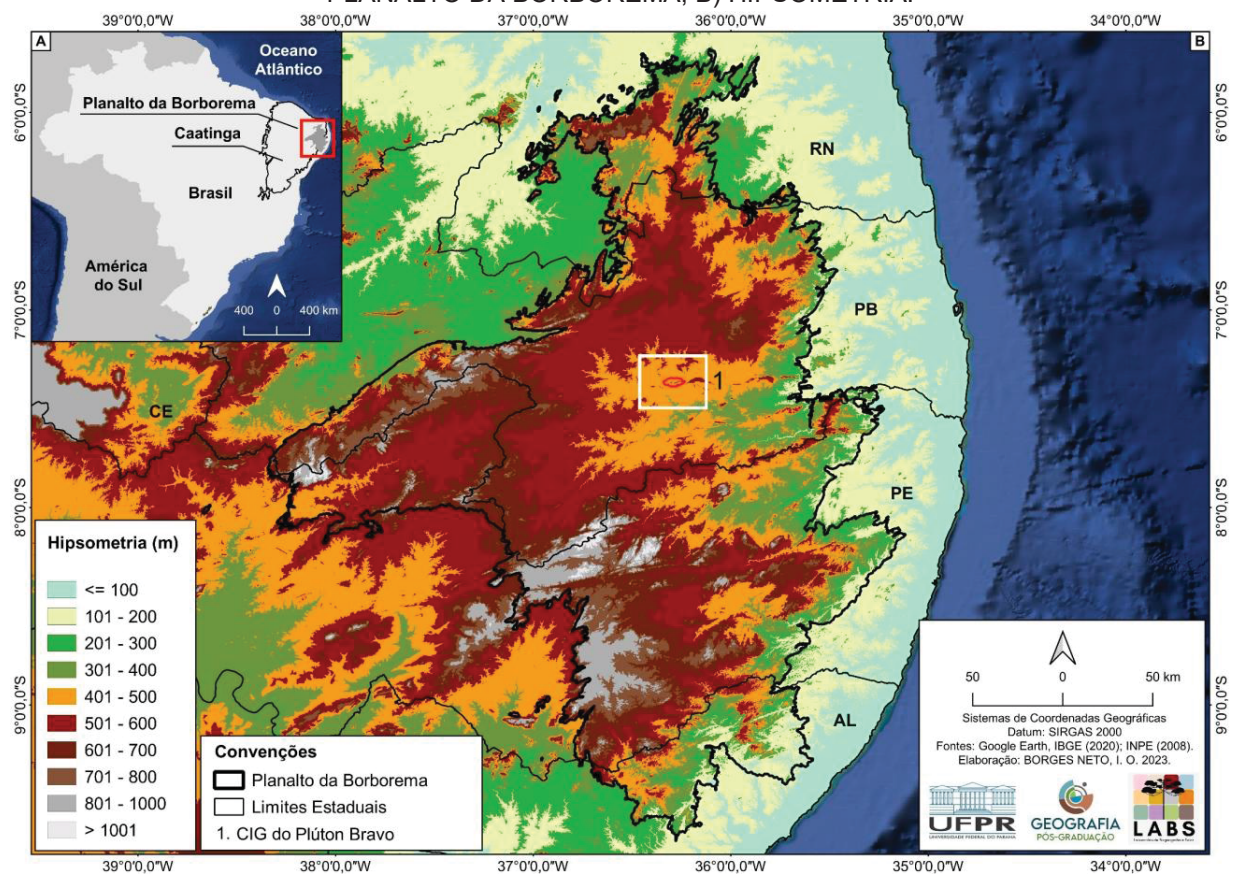
- O capítulo 6 - MATÉRIA ORGÂNICA DOS SOLOS EM INSELBERGS NA CAATINGA apresenta um acabouço de análises detalhadas e complexas sobre seu fracionamento físico, assinaturas isotópicas e composição bioquímica da matéria orgânica existente nos solos dos bolsões em inselbergs. Intitulado de *Mecanismos de persistência da matéria orgânica dos solos de bolsões em inselbergs na caatinga* (item 6.1). Este artigo versa sobre prováveis mecanismos e processos que atuam sinergicamente para a persistência da MOS, na Caatinga. Pretende-se submeter esse artigo a um destes periódicos: *Geoderma*, *Global Change Biology* ou *Soil Biology and Biochemistry*.

2. ÁREA DE ESTUDO

2.1 CONTEXTO REGIONAL

A área de estudo denominada de Campo de Inselbergs Graníticos do Plúton Bravo, está situada no Centro-Norte do Planalto da Borborema (PLB), mais especificamente no interior do estado da Paraíba, Nordeste do Brasil (Figuras 1 e 2).

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO. A) LOCALIZAÇÃO DO BIOMA CAATINGA E DO PLANALTO DA BORBOREMA; B) HIPSOMETRIA.

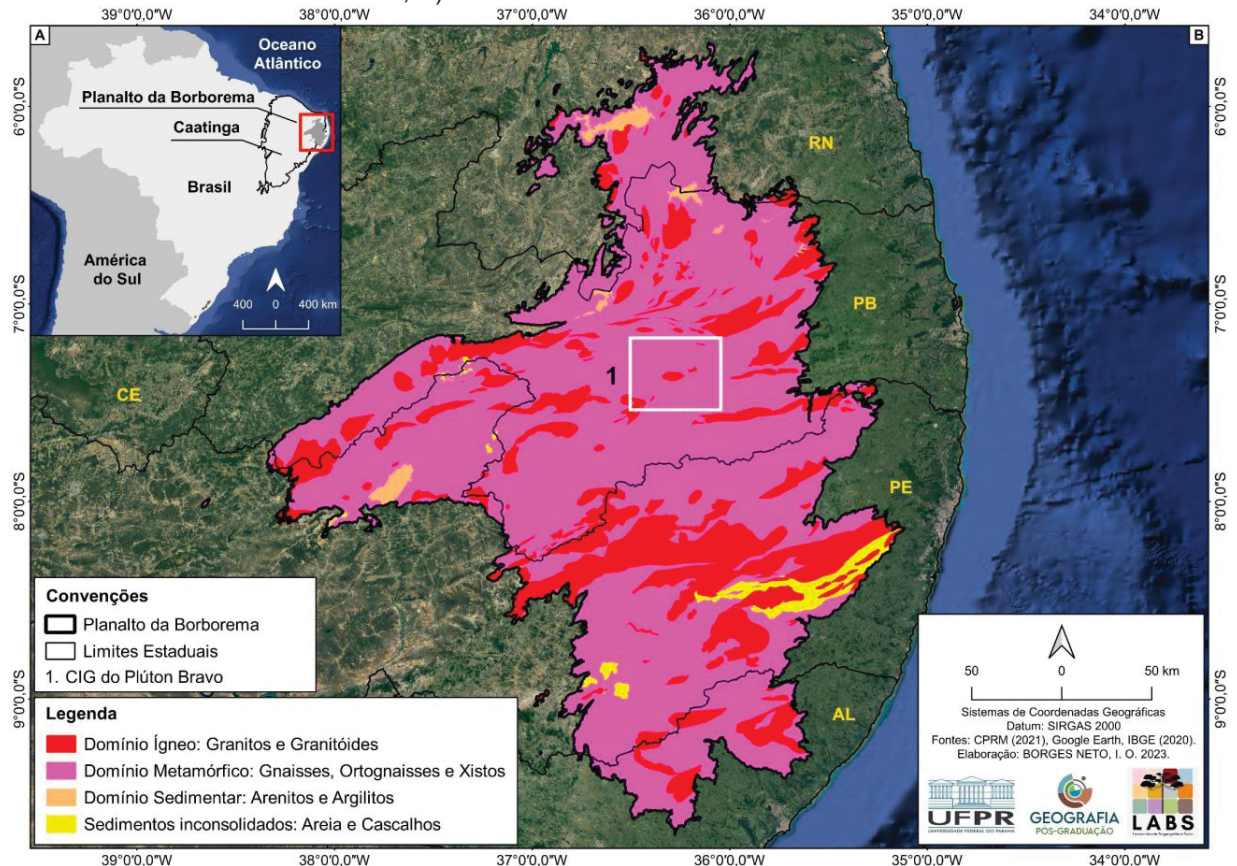


FONTE: Google Earth (2023), IBGE (2020) e INPE (2008). Elaboração própria (2023).

O PLB engloba desde núcleos remanescentes de complexos arqueanos e proterozoicos até faixas de dobramento e intrusões neoproterozoicas (CPRM, 2021; Salgado *et al.*, 2015). Esse complexo rochoso cristalino, que constitui o PLB, segundo Oliveira (2008) é formado principalmente por batólitos graníticos e complexos de rochas

metamórficas gnaíssicas-migmatíticas (Figura 2). Em resumo, sua origem reflete uma série de pulsos epirogenéticos, associados inicialmente ao desmembramento do Gondwana e posteriormente ao magmatismo continental Cenozóico, que atuaram sobre estruturas herdadas, dando origem a um mosaico de subcompartimentos com características distintas do ponto de vista morfoestrutural (Corrêa *et al.*, 2010).

FIGURA 2 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO. A) LOCALIZAÇÃO DO BIOMA CAATINGA E DO PLANALTO DA BORBOREMA; B) GEOLOGIA SIMPLIFICADA DO PLANALTO DA BORBOREMA.



FONTE: CPRM (2021), Google Earth (2023) e IBGE (2020). Elaboração própria (2023).

O PLB apresenta uma altitude que varia entre 200 m na borda leste e 1.200 m em terras altas associadas a um sistema horst-graben de rochas mais resistentes. Segundo a compartimentação proposta por Corrêa *et al.* (2010), o PLB contém oito unidades morfoestruturais, sendo elas: Cimeira Estrutural São José do Campeste, Cimeira Estrutural Pernambuco-Alagoas, Depressão Intraplanáltica do Pajeú, Depressão Intraplanáltica do Ipanema, Depressão Intraplanáltica Paraibana, Depressão

Intraplanáltica Pernambucana, Maciços Remobilizados Pernambuco-Alagoas e Maciços Remobilizados do Domínio da Zona Transversal.

Nesse contexto, destaca-se a Depressão Intraplanáltica Paraibana, onde está situada a área de estudo, com um relevo predominantemente plano em uma extensa superfície erosiva desenvolvida em gnaiss e xisto meso e neoproterozóico (Corrêa *et al.*, 2010; Nascimento; Galindo; Medeiros, 2015). Inselbergs desenvolvidos em granitos Neoproterozóicos, surgem devido a erosão diferencial que rebaixa a superfície regional (Salgado *et al.*, 2015).

Inselbergs e maciços residuais são formas de denudação antigas, haja visto a profundidade crustal de formação das litologias que os sustentam. Entretanto, os ciclos de pedogênese e morfogênese ao longo do Quaternário, podem ter levado a remoção dos mantos de intemperismo e exumação dos inselbergs (superfícies rochosas expostas), sobretudo quando há registro da acumulação coluvial ou de depósitos de tanques (cacimbas) associados (Silva; Corrêa, 2009).

O clima predominante dessa região é o semiárido, caracterizado pela alta irregularidade espaço-temporal na distribuição de precipitação, variando de 350 a 700 mm por ano (Kayano; Andreoli, 2009; Santana, 2007), e a temperatura média varia entre 25° e 30° C, levando a um valor potencial de evapotranspiração quatro vezes maior que a pluviosidade, e isso consequentemente resulta numa semiaridez severa com até oito meses de estação seca (Kayano; Andreoli, 2009). Análises geoquímicas realizadas nos domínios da Caatinga indicam variações climáticas, com umidade no início do Holoceno, seguida por uma fase seca iniciando há cerca de 4.500 anos, com período de chuvas torrenciais há 2.000 anos (Nace *et al.*, 2014; Novello *et al.*, 2012).

As características climáticas do semiárido, normalmente, condicionam à ocorrência de solos com menor grau de desenvolvimento pedogenético na Caatinga, quando comparados aos solos ocorrentes em regiões quentes e úmidas (Araújo Filho *et al.*, 2023). Por isso favorece a concentração relativa de bases Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ (Araújo Filho *et al.*, 2017, 2023). Oliveira *et al.* (2008, 2009) afirmam que os solos típicos da Caatinga apresentam uma relação mais estreita com o material parental.

Em relação a distribuição dos solos, Araújo Filho *et al.* (2017, 2023) enfatizam que as rochas ácidas em conformidade com o relevo do PLB e a drenagem, favorecem a

ocorrência de Neossolos, classe de maior ocorrência, ocupando uma área de 40,49% (sendo 31,67% de Neossolo Litólico; 8,79% de Neossolo Regolítico e 0,02% de Neossolo Flúvico), seguido pelos Argissolos (21,73%) e Planossolos (11,98%) (IBGE, 2021). Para o contexto das rochas ricas em minerais máficos, os principais solos são os Luvisolos (19,61%) e alguns poucos Vertissolos (0,70%) (Araújo Filho *et al.*, 2017; IBGE, 2021). Outras classes como os Latossolos, Nitossolos, Cambissolos e Gleissolos juntos somam apenas 4,76% no PLB (IBGE, 2021).

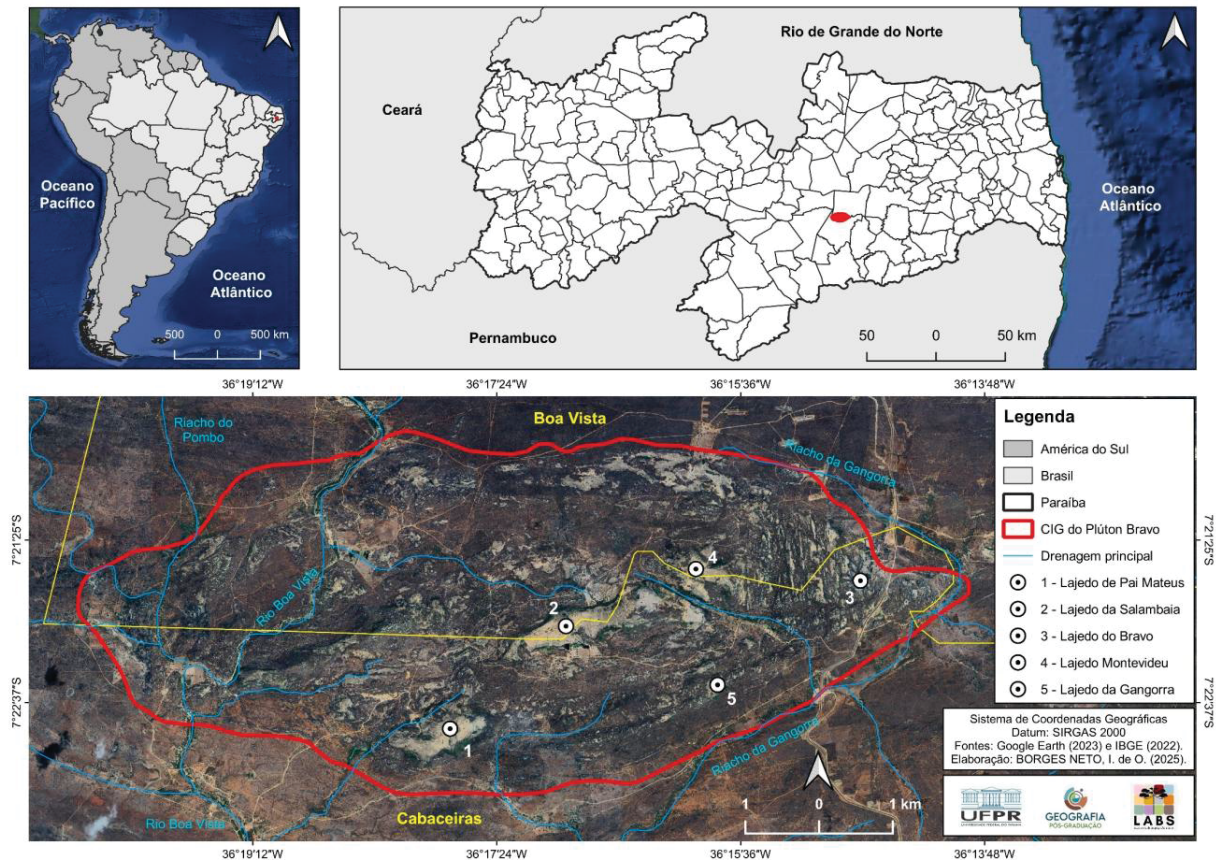
O bioma Caatinga, resultante dessa complexa combinação de elementos físico-ambientais, além de ser o predominante no PLB, usualmente é caracterizado por ser uma formação vegetal caducifolia de porte variável, geralmente arbustivo ou arbóreo arbustivo, de carácter xerófilo, que se distingue pela presença de plantas espinhosas, cactáceas e bromeliácea (Santos *et al.*, 2011; Silva; Leal; Tabarelli, 2017).

Entretanto, nas áreas acima de 800 m de altitude, com a prevalência de condições climáticas mais amenas e úmidas, ocorrem ecossistemas florestais semidecíduais com características distintas àquelas típicas da Caatinga semiárida (Araújo Filho *et al.*, 2023; Souza *et al.*, 2022). Estes ambientes mais elevados e úmidos são denominados de “Brejos de Altitude” (Gois; Corrêa; Monteiro, 2019).

2.2 CAMPO DE INSELBERGS GRANÍTICOS DO PLÚTON BRAVO

A área de estudo está situada entre os municípios de Cabaceiras e Boa Vista, na região do Cariri paraibano (Figura 3).

FIGURA 3 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.

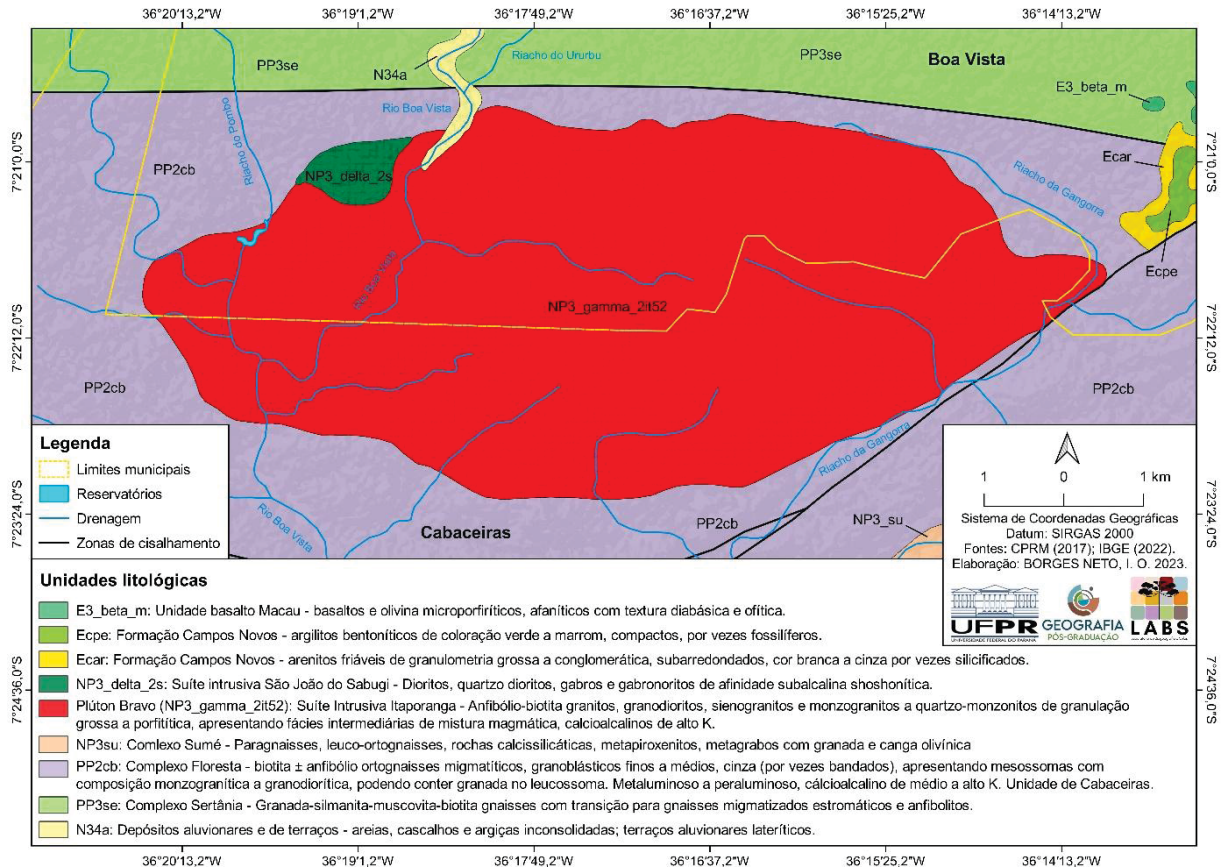


FONTE: Google Earth (2023) e IBGE (2022). Elaboração própria (2023).

Este plúton granítico de acordo com Lages *et al.* (2013) “é um *stock* de biotita monzo/sienogranitos de cor cinza, textura fanerítica inequigranular grossa a porfirítica com megacristais de K-feldspato de até 2 cm, alocado entre duas zonas de cisalhamento conjugadas (NE-SW e E-W)” (Figura 4). Esse grande corpo magmático intrusivo, se cristalizou à cerca de 580 M.a., sofrendo sucessivas fases de soerguimento e metamorfismo, entre o Jurássico e o Cretáceo, favorecido por um extenso soerguimento regional, relacionado ao evento, que fragmentou o supercontinente Pangeia (Lages *et al.*, 2013; Xavier, Borges Neto; Cunha, 2021).

Geomorfologicamente, como já mencionado, o CIG do Plúton Bravo está inserido no interior do PLB. Segundo a compartimentação do PLB realizada por Corrêa *et al.* (2010), a área de estudo situa-se na “Depressão Intraplanáltica Paraibana”, caracterizada por uma extensa depressão, onde a baixa atividade tectônica favoreceu a predominância de processos denudacionais na modelagem do relevo.

FIGURA 4 - GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO EM ESCALA DE 1:100.000.



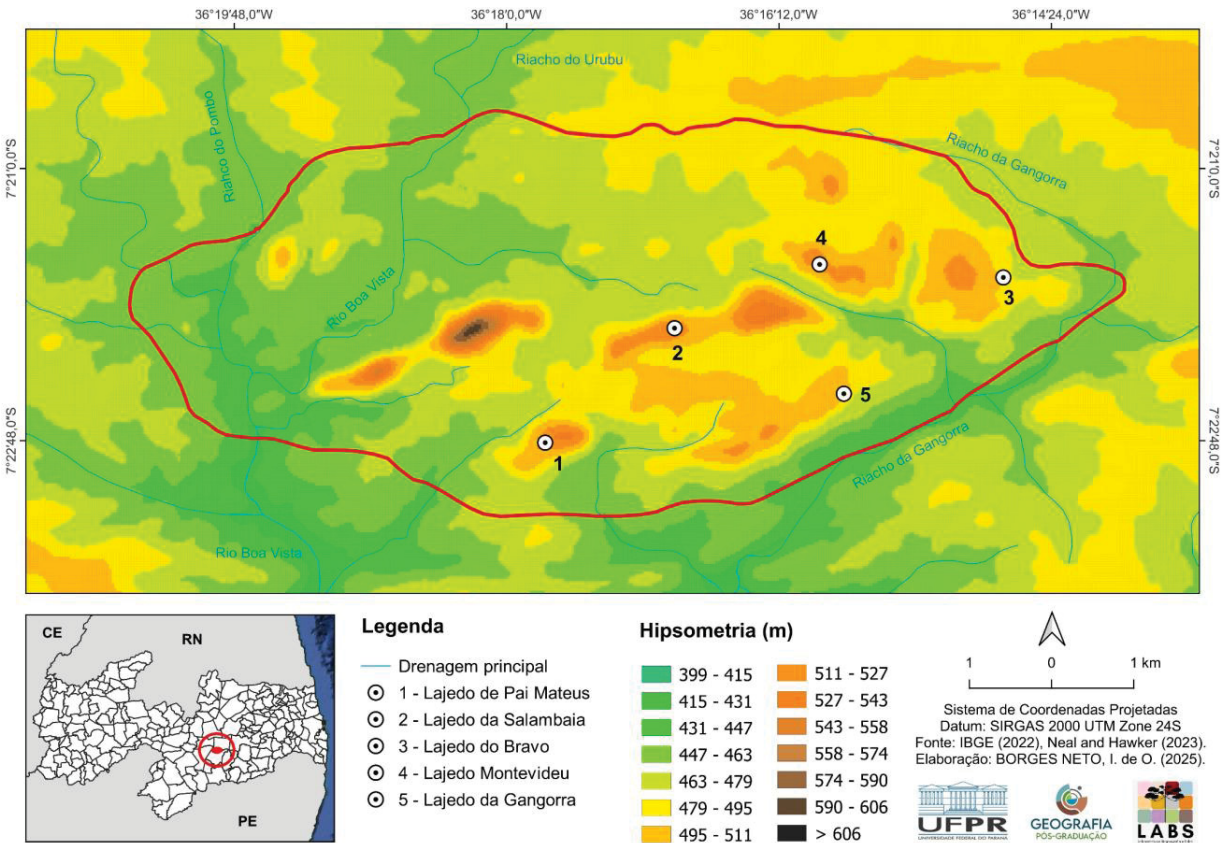
FONTE: CPRM (2017) e IBGE (2022). Elaboração própria (2023).

Se caracteriza como um relevo de amplas colinas suaves separadas por extensos vales aplainados (Xavier; Borges Neto; Cunha, 2021) e uma amplitude altimétrica de 183 m (Figura 5). O ponto mais elevado no CIG do Plúton Bravo é a “Serra da Aldeia” - como é referida pelos moradores locais -, alcançando uma altitude de 609 m, posicionada no Centro-Oeste da área de estudo. As áreas mais rebaixadas atingem uma altitude mínima de 423 m, distribuídas preferencialmente ao longo da drenagem, principalmente na parte Oeste, onde passa o Riacho do Pombo e o Rio Boa Vista (Figura 5).

O Plúton Bravo apresenta forma elipsoidal, com 12 km de comprimento por 5 km de largura, ocupa uma área de aproximadamente 40 km² (Figura 3, 4 e 5). Em sua superfície, as áreas de maior elevação na porção centro-sul estão associadas a ocorrência de inselbergs localmente denominados de “lajedos” (Figura 5). Dentre essas

feições as mais conhecidas são as seguintes: Lajedo de Pai Mateus, Lajedo da Salambaia, Lajedo do Bravo, Lajedo Montevideu e Lajedo da Gangorra (Souza; Xavier; Borges Neto, 2024).

FIGURA 5 – HIPSOMETRIA DA ÁREA DE ESTUDO.



FONTE: IBGE (2022) e Neal e Hawker (2023). Elaboração própria (2023).

Esses lajedos são apenas alguns dos que compõem o CIG do Plúton Bravo e merecem destaque, pois, além de apresentarem a maior extensão espacial, abrigam uma ampla variedade de feições em seus corpos rochosos, como gnammas, fraturas e bordas. Essas características são estratégicas para responder às questões desta pesquisa, pois favorecem o acúmulo de recursos naturais essenciais, como água, sedimentos e resíduos vegetais e animais (Lunguinho, 2018; Salvador *et al.*, 2023; Souza; Xavier, Borges Neto, 2024).

Na área de estudo os lajedos são considerados como grandes áreas de superfícies rochosas expostas, normalmente de constituição granítica, com amplitudes altimétricas

que raramente ultrapassam 100 m (Souza; Xavier, 2017; Souza; Xavier; Borges Neto, 2024). Lages *et al.* (2013) afirmam que geralmente esses lajedos assumem formas dômicas assimétricas do tipo *whaleback* (dorso de baleia).

Segundo Xavier, Borges Neto e Cunha (2021), é comum, sobre os lajedos a presença de bacias rochosas (gnammas), sendo também conhecidas como *wethering pits* ou *pias*, que se originam a partir de processos de intemperismo diferencial (Twidale, 1982; Twidale; Bourne, 2018). Em geral, as gnammas são as feições dominantes na parte superior dos lajedos, ocorrendo nas formas fechadas, abertas e/ou em processo de coalescência com outras (Xavier; Borges Neto, Cunha, 2021). Apresentam uma variedade de tamanhos, que podem ser de poucos centímetros até dezenas de metros de diâmetro.

Em relação ao contexto climático local, a precipitação média anual varia entre aproximadamente 316 e 418 mm (DCA-UFCG, 2022) concentrando-se entre os meses de março a junho (Breckam *et al.*, 2013), enquanto as temperaturas médias anuais ficam em torno de 27 °C (Nascimento *et al.*, 2014), com pouca variação sazonal, provavelmente vigente há pelo menos 4.000 anos (Souza *et al.*, 2023). Os lajedos são predominantemente expostos ao sol, enquanto suas bordas e algumas depressões topográficas intermediárias estão sob comunidades florestais e arbustivas bastante densas, com exemplares de espécies da Mata Atlântica, da Amazônia e do Cerrado, além de solos com teor de C orgânico mais elevado se comparado aos solos tipicamente registrados na Caatinga (Lunguinho, 2018; Medeiros, 2019; Migoñ; Maia, 2020; Salvador *et al.*, 2023; Souza *et al.*, 2022).

3. ARRANJO METODOLÓGICO

3.1 TRABALHOS DE CAMPO E OBTENÇÃO DE DADOS

O primeiro ano de doutoramento, em 2021, foi exclusivamente voltado para cursar as disciplinas e obtenção dos créditos, tudo feito remotamente por conta da pandemia do COVID-19. No segundo ano, em 2022, foram realizadas três campanhas de campo, sendo elas: i) campo exploratório ocorrido entre 18 e 21 de janeiro – com objetivo de visitar e reconhecer diversas áreas potenciais sobre o Planalto da Borborema. Nesse campo foram discutidas uma série de propostas temáticas e de áreas, pensando no seu impacto científico e viabilidade de execução, optando-se por um esboço inicial da proposta aqui desenvolvida; ii) primeiro trabalho de campo exclusivo para a área do CIG do Plúton Bravo, realizado no período de 25 a 30 de junho – nessa campanha a ideia foi identificar, avaliar e discutir os locais mais significativos para as coletas de solo, contando com a abertura de um perfil; iii) segunda campanha de campo ocorrida entre 21 e 25 de novembro – nesse trabalho de campo foram abertos, descritos e coletados dez perfis de solo em diferentes posições topográficas e ambientes dos inselbergs no Plúton Bravo, previamente no campo anterior.

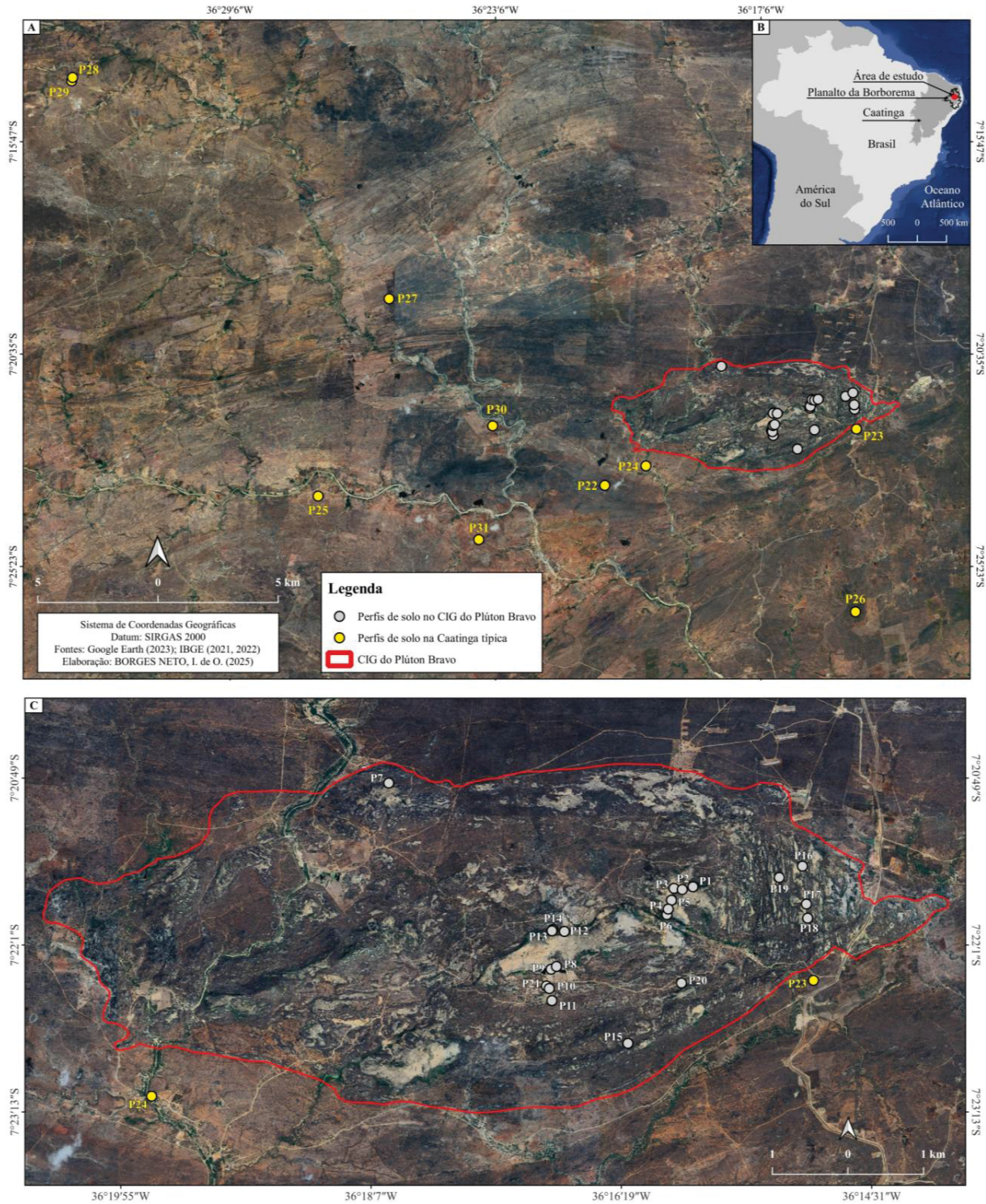
É importante ressaltar que as parcerias estabelecidas entre pesquisadores e seus respectivos grupos de estudos e instituições foram essenciais à execução dessa proposta. Com isso, foi possível ter acesso a um banco de dados – particular – amplo e diverso, com análises de solo, geomorfologia e vegetação com início de obtenção em 2017, que agregou ainda mais informações a esse manuscrito.

Esse banco de dados pertence a uma rede de pesquisa sobre mudanças ambientais e dinâmica da paisagem do semiárido brasileiro, com a maioria das informações coletadas na região do Cariri paraibano, envolvendo os seguintes parceiros: Laboratório de Estudos do Semiárido da Universidade Federal da Paraíba (LAESA-UFPB) sob a coordenação do Prof. Dr. Bartolomeu Israel de Souza; Grupo de Estudos Geomorfológicos e Hidroecológicos de Ambientes Tropicais da Universidade Estadual da Paraíba (GEGHAT-UEPB) coordenado pelos professores Dr. Rafael Albuquerque Xavier e Valéria Raquel Porto de Lima; Departamento de Solos da Universidade Federal de

Viçosa (DPS-UFV), contando com a parceria do Prof. Dr. José João Lelis Leal de Souza; e mais recentemente, em 2021, o Laboratório de Biogeografia e Solos da Universidade Federal do Paraná (LABS-UFPR) sob a liderança do Prof. Dr. Leonardo José Cordeiro Santos.

A seguir, na Figura 6, é possível observar a distribuição espacial de todos os perfis de solos analisados nesta pesquisa. Ao todo, foram considerados 31 perfis de solo, sendo 21 perfis no CIG do Plúton Bravo e 10 perfis no contexto típico da Caatinga (Figura 6). Os perfis P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P17, P18, P19 e P24 foram coletados exclusivamente para esta pesquisa durante os trabalhos de campo de 2022, enquanto os perfis P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16, P20, P21, P22, P23, P25, P26, P27, P28, P29, P30 e P31 são oriundos do banco de dados privativo, do qual também participou-se das coletas, e que foram gentilmente fornecidos através das parcerias estabelecidas (Figura 6). A partir dessa variedade de perfis, foi possível comparar as propriedades dos solos situados em diferentes contextos paisagísticos, e assim avançar na compreensão da sua gênese.

FIGURA 6 – DISTRIBUIÇÃO DOS PERFIS DE SOLO ANALISADOS (A E C). LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO (B).



FONTE: Google Earth (2023) e IBGE (2021, 2022). Elaboração própria (2025).

3.2 PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS

Todos os perfis de solo descritos e coletados, tanto os exclusivos para esta pesquisa como os perfis do banco de dados, foram devidamente embalados e enviados para serem realizadas as análises químicas e físicas nos laboratórios de solos do Departamento de Solos da UFV, em Viçosa, Minas Gerais. Durante o último semestre de 2024, em virtude da necessidade de compreender melhor os possíveis mecanismos de persistência da matéria orgânica dos solos nos bolsões dos inselbergs, realizou-se uma Mobilidade Acadêmica para a UFV, para cursar a disciplina sobre matéria orgânica do solo (SOL – 660) e poder realizar os procedimentos laboratoriais necessários a construção do artigo do capítulo 6.

Num primeiro momento, consultou-se outros pesquisadores com expertise na temática vinculados ao Laboratório de Isótopos Estáveis (LIE-UFV), para definir quais técnicas/análises seriam mais viáveis e disponíveis de serem realizadas no laboratório e que pudessem responder as questões levantadas na Tese.

Seguindo as diretrizes adotadas, optou-se pelo fracionamento físico da matéria orgânica do solo (MOS) conforme o método proposto por Cambardella e Elliott (1992). Esse procedimento permite a separação da MOS em duas frações: a matéria orgânica associada aos minerais (MOAM) e a matéria orgânica particulada (MOP). Após o fracionamento, foram determinados, em cada fração, os teores de Carbono (C) e Nitrogênio (N), bem como suas assinaturas isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$.

Esse procedimento permite identificar qual fração é mais rica em C e N, além de indicar a possível origem da MOS ($\delta^{13}\text{C}$) e a ciclagem de nutrientes ($\delta^{15}\text{N}$). Logo em seguida, utilizou-se o material restante das frações para empregar uma Termoquimólise usando Hidróxido de tetrametilamônio (HTMA) off-line, de acordo com Chefetz *et al.* (2000) e Del Rio *et al.* (1998). Essa técnica permite compreender a composição bioquímica da MOS, e a partir disso, sugerir a possível origem dos compostos orgânicos.

Os demais detalhamentos são apresentados nos capítulos de cada artigo, com fins de maior praticidade e melhor organização.

4. RELAÇÕES SISTÊMICAS ENTRE RELEVO-SOLO-PLANTA EM AFLORAMENTOS ROCHOSOS

Nesse capítulo o objetivo é apresentar um panorama acerca das principais interações identificadas entre relevo-solo-planta observadas em afloramentos rochosos sob condições climáticas quentes e secas, numa escala global. Baseado numa busca sistemática pela literatura, foram selecionados estudos que pudessem ajudar a encontrar padrões nas relações entre as variáveis escolhidas, e se eram passíveis de serem extrapoladas para ambientes de litologias e morfologias distintas. Também foram observadas as principais tendências e lacunas dos estudos sobre esses ambientes. Em resumo, esse capítulo norteou os demais capítulos da Tese.

Este capítulo representa o artigo já publicado no periódico *Sociedade & Natureza*, vinculado ao Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais. Esta revista é um veículo de divulgação científica iniciado em 1989, com classificação (A1) para periódicos na área de conhecimento da Geografia, segundo o Qualis CAPES (sistema brasileiro de avaliação de periódicos). Link de acesso: <https://seer.ufu.br/index.php/sociedadennatureza/article/view/75884> ou DOI: 10.14393/SN-v37-2025-75884.

4.1 LITERATURE REVIEW OF RELIEF-SOIL-PLANT INTERACTION IN ROCK OUTCROPS

4.1.1 Abstract

Rock outcrops (ROs) are geological-geomorphological features that span a wide variety of climates and biomes. In hot arid and semiarid regions, ROs support the occurrence of landscape elements different from those in the surrounding matrix. Furthermore, ROs are essential for protecting and maintaining specialized ecosystems, serving as a shelter for biodiversity. This importance is even more visible with the growing number of publications. A systematic literature review synthesized the relief-soil-vegetation relations influenced by ROs under hot arid and semiarid climates. A bibliometric survey was carried out on the Scopus platform throughout the available sample period (1903-2022). The searches

focused only on research and review articles in English in the title, abstract, and keyword fields. Most ROs studies focused on biological components, mainly vegetation, while climate, relief, and soil are considered support variables. ROs are essential for the occurrence and persistence of specialized ecosystems. Differential erosion, faults and accumulation of sediments, organic residues and water create microhabitats in ROs. These microhabitats host a high richness and diversity, once submit species to different temperature and soil moisture regimes. This diversification of microhabitats provides biodiversity with relatively safer and more stable shelters, characterizing them as refuges in dry climates and protecting elements that indicate past temporal conditions. Future studies/analyses should investigate how variables operate in these environments.

Keywords: Abiotic and biotic interactions; biodiversity; ecological refuges; inselbergs; microhabitats.

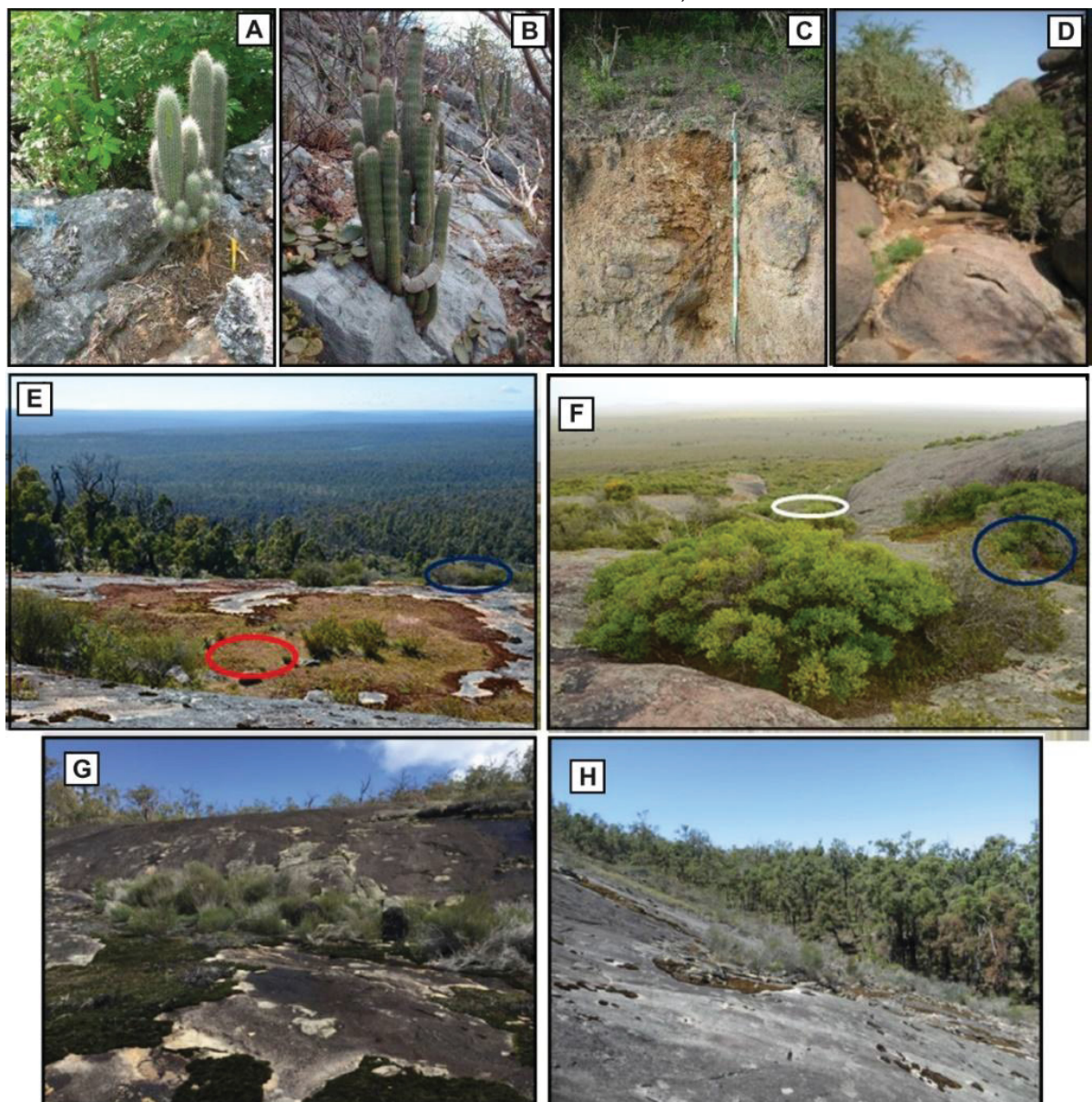
4.1.2 Introduction

Rock outcrops (ROs) are litho-structural formations that project above the surface of the surrounding land (Fitzsimons; Michael, 2017). This term has been used to identify landscapes with surfaces predominantly composed of rock (Kulkarni *et al.*, 2022; Porembski; Barthlott, 2000). They are found on all continents, in various climates, biomes, and origins (Migoń, 2006; Twidale, 2002; Twidale; Romani, 2005).

Typically, ROs have very clear boundaries compared to the predominant landscape matrix. The higher elevation in relation to their surroundings, differences in porosity, and the different morphologies of the ROs (Figure 7) control the flow of water, sediments, nutrients and organic residues into depressions - e.g., gnammas or cavities – (Figures 7A; 7E; 7F), cracks/fissures/fractures (Figures 7B; 7D; 1G) and especially to the surrounding rocky slopes (Figures 7F; 7H), constituting depositional and water recharge zones (Letz *et al.*, 2021; Schut *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2019). These areas accumulate water and sediment, providing favorable conditions for the colonization of plant species - often considered azonal species - (Bárcenas-Argüello *et al.*, 2010; Burke, 2001, 2002; Clark-

Ioannou; Wardell-Johnson; Millett, 2021; Porembski, 2007; Szarzynski, 2000) and the development of soil with higher contents of organic carbon (Pérez, 2023; Zhu *et al.*, 2017).

FIGURE 7 - MICROHABITATS DIVERSIFICATION IN ROS ACCORDING TO THEIR GEOMORPHIC POSITION. SUMMIT CONDITIONS: CRACKS/FISSURES (A AND B) AND GNAMMAS (E – RED CIRCLE, AND F). SHOULDER, BACKSLOPE, AND FOOTSLOPE CONDITIONS: SHALLOW SOILS (C), CRACKS/FISSURES (B, D AND G) AND GNAMMAS (F – BLUE CIRCLE). TOESLOPE CONDITIONS (F – WHITE CIRCLE, AND H).



SOURCE: Figures A, B, and C are examples of Mexican ROs (Bárcenas-Argüello *et al.*, 2010); D example of ROs in Niger (Anthelme; Mato; Maley, 2008); E and F (Yates *et al.*, 2019), G and H (Clark-Ioannou; Wardell-Johnson; Millett, 2021) both examples of ROs in Australia. Elaboration by author (2023).

The ROs isolate ecosystems and induce the occurrence of endemic plant species (Fitzsimons; Michael, 2017; Ottaviani; Marcantonio; Mucina, 2016). In general, ROs favor the occurrence of isolated ecosystems (terrestrial islands), interspersed in the surrounding landscape, a condition that makes them favorable to the presence of endemic plant species, as well as others not yet known, occurring especially in arid and semiarid climate environments (Fitzsimons; Michael, 2017; Ottaviani; Marcantonio; Mucina, 2016). Each RO houses different microhabitats, with different soil conditions and microclimatic factors. Summits and gentle slopes have shallow, seasonally flooded soils isolated by bare rock. Seasonal herbaceous species or low shrubs cover these areas. At the base of RO, soils accumulate water and sediments carried from the upper part, forming deeper soils, continuous, dense, and tall vegetation (Bárcenas-Argüello *et al.*, 2010; Schut *et al.*, 2014; Yates *et al.*, 2019). The relative isolation between microhabitats (Oliveira; Godoy, 2007; Ornduff, 1987; Keppel *et al.*, 2012) leads to an increase in diversity in plant communities (Kluge; Brulfert, 2000; Porembski; Barthlott, 2000).

The ROs in humid tropical regions, such as southeastern Brazil, are usually occupied by species adapted to xeric ecosystems (Porembski; Barthlott, 2000; Porembski *et al.*, 1998). The opposite is observed in dry environments, such as southwestern Australia (Clark-Ioannou; Wardell-Johnson; Millett, 2021) and the desert regions of Namibia (Burke, 2001, 2002, 2003a), Niger (Anthelme; Mato; Maley, 2008), Iran (Rafiee *et al.*, 2022) and Israel (Yair; Danin, 1980). In dry climate conditions, ROs regulate the flow of rainwater to the lower areas close to their surroundings, allowing greater accumulation of moisture compared to the predominant landscape matrix, and thus favoring the colonization of plants adapted to mesic environments (Burke, 2003b; Lopes; Ramos; Almeida, 2017; Porembski, 2007; Schut *et al.*, 2014; Yates *et al.*, 2019). Burke (2001, 2002, 2003b) and Oliveira and Godoy (2007) state that ROs induce shallow soils, high temperature fluctuations, insolation and strong winds, water scarcity and high evaporation rates, composing what many authors call "xeric islands" under the regional domain of humid climates (Porembsky *et al.*, 1998; Parmentier, 2003), presenting a high regional diversity of plant communities (Kluge; Brulfert, 2000).

ROs occur in a wide variety of climates, although they are more abundant in dry conditions, presenting diverse microhabitats (Porembski *et al.*, 1998; Rafiee *et al.*, 2022;

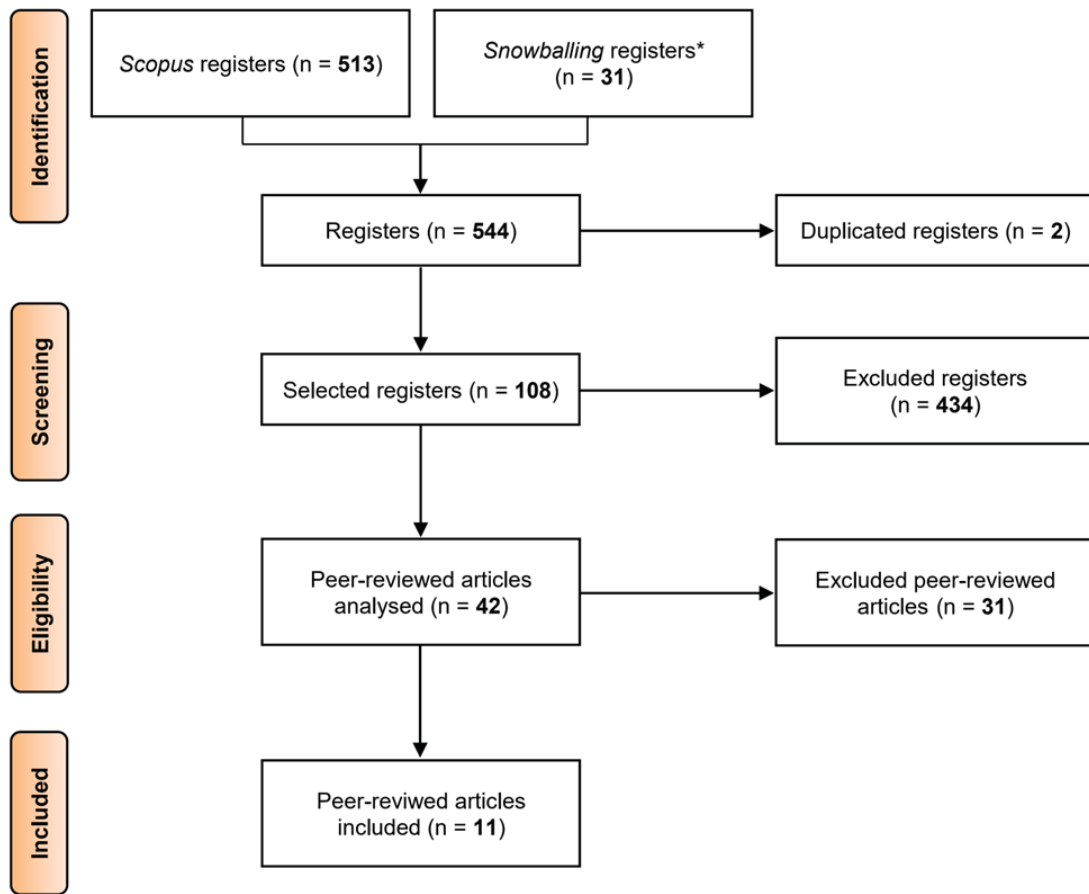
Twidale; Romani, 2005). They thus harbor species with distinct ecological requirements, whose composition reflects the depth of the soils and topographic gradients on a local scale associated with regional climatic conditions which, together, affect the availability of water (Parmentie; Stévar; Hardy, 2005; Sarthou *et al.*, 2017; Schut *et al.*, 2014). Although there is growing interest in studies of these areas, many gaps still need to be filled, particularly those concerning the presence of plant species and the specific environmental factors that determine their colonization in these areas (Yates *et al.*, 2019).

Based on this, we decided to carry out a systematic review of the existing literature to synthesize the main interactions that occur between relief, soil and vegetation influenced by ROs under hot arid and semiarid climates. Our work aims to: (I) characterize the types of rocky outcrops studied (landforms, lithology and geographical location); (II) analyze the aims of the studies; (III) synthesize the main geomorphological, pedological and ecological conditions of the ROs that support a vegetation distinct from the environmental characteristics of the predominant landscape matrix; and (IV) identify the existing gaps and suggest ways of solving them.

4.1.3 Methodology

We used the Scopus database, the most extensive grouping of information from summaries and citations of peer-reviewed literature, with bibliometric tools to track, analyze, and visualize the research. Only scientific articles published in English were considered. The source should meet the criteria of a peer-reviewed article or full-text review with abstracts and texts available electronically. Based on the methodological proposal of the protocol Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analysis – PRISMA (Page *et al.*, 2021; Pham *et al.*, 2014), the following steps (Figure 8) were included in the systematic review:

FIGURE 8 - FLOWCHART OF THE STUDY SELECTION PROCESS.



* The snowballing was carried out only on articles previously selected from Scopus's database.

SOURCE: Adapted from PRISMA (Page *et al.*, 2021; Pham *et al.*, 2014). Elaboration by author (2023).

1. **Identification:** potential articles were listed in the selected electronic database, and snowballing was used to add relevant articles, manually analyzing the references section of the articles (GREENHALGH; PEACOCK, 2005). The search query applied to the database included the following terms: *rock**, *outcrop**, *arid**, *semiarid**, *semi-arid**, *dry**, *hot**, *soil**, *plant**, *vegeta**, *landform**, *water**. We truncated the suffix of all the words, using the "*" to broaden the scope of the searches. The initial search was implemented in September 2022 and updated in January and February 2023. The entire sample period available by Scopus (1903-2022) was considered except for 2023. All information regarding the selected articles was imported, and duplicate records were removed.

2. **Screening:** manuscripts that did not meet the minimum inclusion criteria were excluded after analysis of title, abstract, and keywords.
3. **Eligibility:** manuscripts that did not address in detail the interactions between soil-plant-geomorphology in the ROs were excluded.
4. **Included:** articles that met the eligibility criteria were included, tabulated and analyzed in subsequent sections. Those that were excluded in this selection phase but were considered useful for this review were also referenced in other sections.

4.1.3.1 Methodological arrangements of selected articles

The methodological framework was divided into the most present environmental variables, namely: climatological, geomorphological, pedological, and vegetation. Subsequently, these variables were subdivided to facilitate further the organization and understanding of the respective methodological information in the articles included in the review. With this, we have the following:

1. **Climate:** Seasonality – use of data relating to precipitation and temperature at certain times of the year to compare the temporal variation of results; Precipitation and Temperature – measured and used in studies.
2. **Geomorphology:** Geographic position – refers to its exact positioning, the degree of isolation of an RO concerning others, and the direction of the slopes; Geomorphic position – compartmentalizes the position of microhabitats, following a geomorphic surface logic (Alves *et al.*, 2024; Zinck, 2023); Topographic aspects – the topographic characteristics of ROs are relative, such as slope, degree of curvature and amplitude.
3. **Soil:** Physical soil properties – in this item only texture/granulometry was considered, as it was the predominant analysis in the selected studies; Chemical soil properties – analyzes of pH (acidity), nutrient content (Ca, Mg, P, K, N, etc.) and organic carbon (C) were considered when available.
4. **Vegetation:** Phytosociological survey – standardized collection of vegetation; Taxonomic diversity – quantification of the number of species presents in an area;

Functional diversity – expresses the degree of functional differences between species. We searched the literature for studies on taxonomic diversity involving Angiosperms, given their permanent nature in arid and semiarid climate areas as well as their functional diversity.

4.1.3.2 Word cloud elaboration

To understand the predominance of modal concepts used in the studies selected in this review, a word cloud was created. We selected only the titles, abstracts and keywords of the articles. The word cloud was created on the *Flourish** platform and is free of charge at the following website: <https://flourish.studio/>.

4.1.4 Results

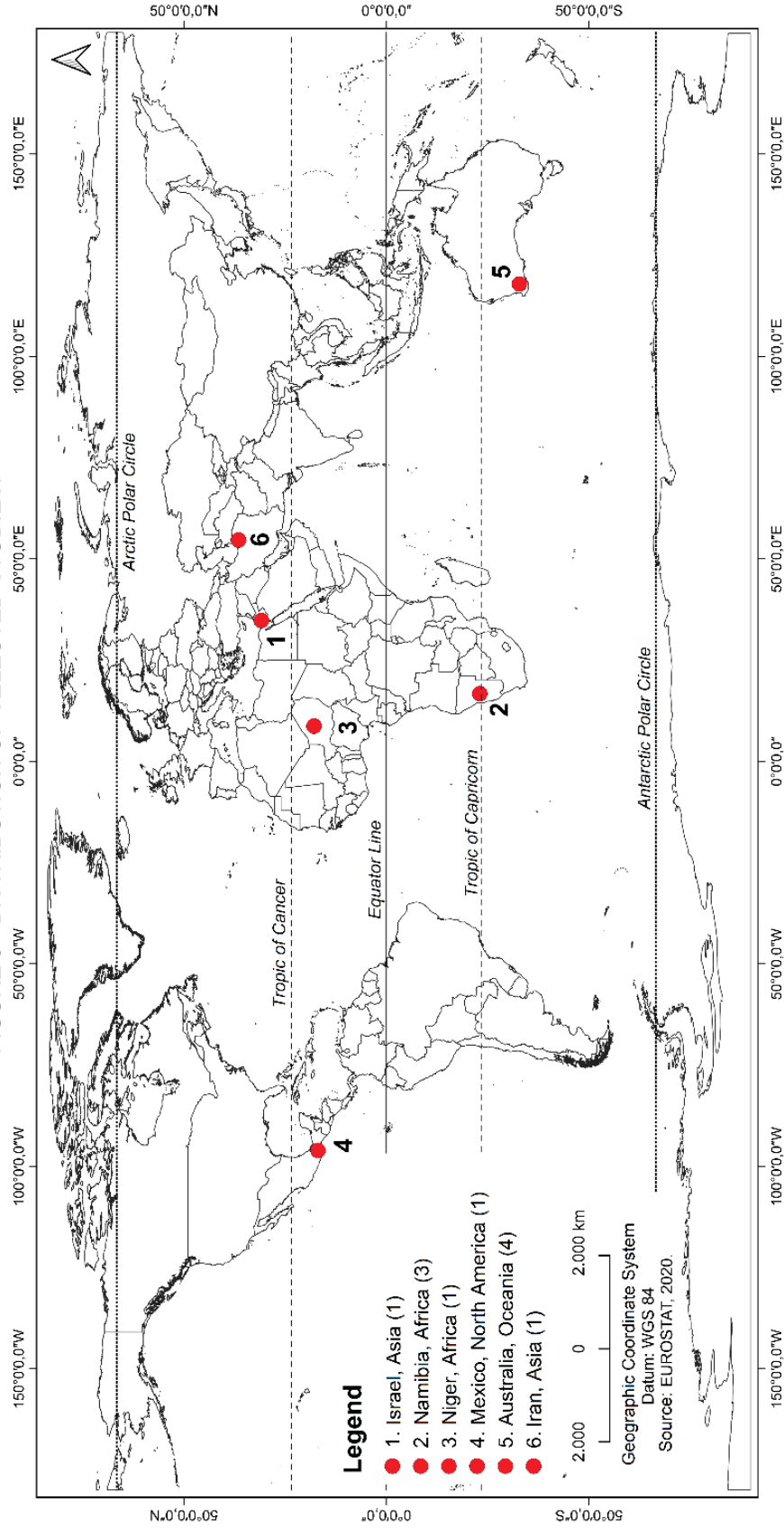
4.1.4.1 Overview

After all identification, screening, eligibility, and inclusion procedures based on PRISMA (Figure 8), 11 articles were selected for review (APÊNDICE A). Figure 9 and Table 1 show, respectively, the location and main characteristics of the study areas of these articles.

According to Table 1, it was observed that studies are mainly concentrated in Australia (4) and Namibia (3). The other articles are evenly distributed in Israel (1), Niger (1), Mexico (1) and Iran (1). The geology is variable, with emphasis on the predominance of granites (7), followed by limestone (3) and basalt (2). Regarding the different landforms, inselbergs are the most recurrent (6), followed by mountains and hills with two each. Mesa (tableland) had only one study (Table 1).

The elevation of the study areas varies between 125 m in Australia and 2.655 m in Iran, revealing a wide variation (Table 1). The areas with lower altitudes are located in Australia (125 m), Mexico (163 m), and Israel (478 m), conversely in Iran (2.655 m), Niger (2.000 m), and Namibia (1.379 m), there are areas higher.

FIGURE 9 - DISTRIBUTION OF SELECTED STUDIES.



SOURCE: EUROSTAT (2020). Elaboration by author (2023).

Average annual rainfall varies from 50 mm in African countries (Namibia and Niger) to 1.400 mm in Australia. As a reflection of the previously mentioned physical-environmental configurations, it was observed that the vegetation formations are quite diverse and complex, ranging from Forests (6), Barren Desert (5), Herbaceous (4), Woodlands (4), Scrubs (4) and Dwarf scrub (3). It is evident that in Australia, all studies were carried out in the so-called Southwest Australian Floristic Region (SWAFR), one of the most important hotspots of biodiversity in the world (Zachos; Habel, 2011).

TABLE 1 - GENERAL CHARACTERISTICS OF THE STUDY AREAS.

Country/ Continent	Geology	Landform	Elevation (m)	Precipitation (mm) ¹	Vegetation formation ²		References
					Class	Subclass	
Israel, Asia	Limestone	Hill	478	91	Barren Desert	Rock desert	Yair e Danin (1980)
					Barren Desert	Rock desert	
					Dwarf scrub	Mainly deciduous	
					Herbaceous	Savannas	
Namibia, Africa	Basalt	Mesa (tableland)	800-1.200	50-100	Barren Desert	Rock desert	Burke (2001; 2002)
					Dwarf scrub	Mainly deciduous	
					Herbaceous	Savannas	
					Barren Desert	Rock desert	
Niger, Africa	Regionally granitic and locally volcanic	Mountain (Extinct volcano)	1.400-2.000	50-100	Barren Desert	Rock desert	Burke (2003a)
					Dwarf scrub	Mainly deciduous	
					Herbaceous	Savannas	
					Barren Desert	Rock desert	
Mexico, North America	Ranges from limestone with quartz, metallic limestone, andesite, siltstone to mica schist	Hill	163-1.000	798	Barren Desert	Rock desert	Anthelme, Mato and Maley (2008)
					Barren Desert	Rock desert	
					Barren Desert	Rock desert	
					Barren Desert	Rock desert	
Australia, Oceania	Granite	Inselberg	125-555	314-1.208	Forests, Woodlands and Scrub	Mainly deciduous	Schut <i>et al.</i> (2014)
			326-547	300-1.100			Ottaviani, Marcantonio and Mucina (2016)
			125-555	300-1.400			Yates <i>et al.</i> (2019)
			324-495	800-1.000			Clark-Ioannou, Wardell-Johnson, Millett (2021)
Iran, Asia	Limestone	Mountain	882-2.655	160-910	Herbaceous	Steppes	Rafiee <i>et al.</i> (2022)
					Forests	Mainly evergreen	

¹ Average annual precipitation in millimeters. ² Adapted of International Union for Conservation of Nature and Natural Resources - IUCN (1973). Elaboration by author (2023).

4.1.4.1.1 Word cloud

The word cloud was created based on the most recurrent keywords in the 11 selected articles (Figure 10). In Figure 10, the 50 words with the greatest predominance can be seen. Of these, the following stand out: “soil(s)” (56); “species” (37); “plant(s)” (35); “island mountain(s)” (34); “outcrop(s)” (34); “habitat(s)” (31); “vegetation” (22); “granite” (21); “diversity” (20); and “floristic(s)” (20). These terms suggest that the fields of knowledge focused on the biotic environment, such as ecology, botany and biogeography, are the most present in studies on ROs. Other words, like, “biodiversity” (17), “conservation” (13), “functional” (11), “environmental” (10), and “community(ies)” (10), seem to reinforce this preference.

FIGURE 10 - CLOUD OF THE 50 MOST USED WORDS IN THE ARTICLES INCLUDED IN THIS REVIEW.



SOURCE: The author (2023).

4.1.4.2 Methodological aspects

The main objects of the selected studies were divided into the four most common environmental variables (Figure 11). The most significant emphasis is given to

geomorphological analyses (29 - orange boxes), followed by vegetation (21 - green boxes), climatic elements (10 - blue boxes), and, finally, soil (9 - brown boxes).

In geomorphological analysis, it is possible to observe that topographic aspects are present in all studies, followed by geographic position (10) and geomorphic position (8). In the context of vegetation, the phytosociological survey (10) is a basic procedure, serving as a prerequisite for analyses of taxonomic diversity (8) and functional diversity (3).

FIGURE 11 - OVERVIEW OF THE MAIN ENVIRONMENTAL VARIABLES USED IN THE SELECTED STUDIES.

Sources	Environmental variables										
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
		</									

Soil classification was mentioned in a general way, with the most probably soil groups and orders but no soil profiles were identified in the studies. Even so, there is a wide variety of approaches. Analyzes of physical properties are restricted to granulometry (5), while the chemical properties monitored include pH, organic carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P), and exchangeable contents of potassium (K), sodium (Na), calcium (Ca), magnesium (Mg) and iron (Fe) (4).

About climatic elements, precipitation is the most used (6), while only two studies addressed seasonality and temperature. In fact, for arid and semiarid environments, precipitation is the most important regional climate factor (Rafiee *et al.*, 2022).

4.1.5 Description of the main results and interactions observed in the selected articles

1. **Yair and Danin (1980):** The authors observed two trends in the spatial variability of the soil moisture regime: a) In areas of resistant rocks and low porosity, the moisture regime is controlled mainly by the bedrock structure, i.e. by the thickness of the rock strata and the spacing between adjacent fissures/faults/fractures. In the case of massive limestone, the rock strata are thick and contain spaced joints. Surface properties are characterized by extensive ROs and deep fissures/faults/fractures in the rock (ranging from 100 to 150cm) filled with limited volumes of soil. Combining these extensive rocky surfaces – where runoff is high – with the limited soil volume (collecting water directly from rain and subsequently from runoff) resulted in a better water regime on slopes (ROs) in arid environments. The dimensions of water and sediment/soil receiving areas can vary greatly over short distances, favoring a wide diversity of microhabitats in ROs with uniform lithology and appearance. Dense, shallow joints and relatively thin rock strata were visualized for not massive rock units. Surface properties are characterized by very limited/small ROs and shallow, stony soils. Under these conditions, water entry via runoff is limited, resulting in a relatively poor to very poor water regime. Field observations carried out in the deserts of Israel and Sinai indicate that: a) the relationship between rock structure and soil moisture regime described above can also be found in other massive rock formations, such as dolomite and granite; b) along slopes with the lower part covered by a colluvial blanket, the thickness of which increases along the slope, a systematic and gradual

decrease in soil moisture content was recorded in the colluvium section. This trend is probably caused by the fact that most, and often all, of the surface runoff generated in the upper rocky part of the slope infiltrates the upper to middle part of the colluvium. The lower part of the colluvium is typically fed by the limited amount of direct rain that falls in the area. Such a water regime implies, over a slope length of 20-30m, a rapid transition from a Mediterranean-Iranotorean plant community to a community where Saharo-Arabian species predominate.

2. **Burke (2001):** a) At a landscape scale (macroscale), the floristic composition of inselberg plant communities was largely determined by the geographic position, geology, elevation, habitat diversity, surrounding the ROs and the surface area of the inselbergs; b) the environmental variables that operate at the landscape level had a greater influence on the functional composition than on the floristic composition; c) stochastic variables were more important in the formation of the flora of the arid inselbergs of Nama Karoo than deterministic processes, such as niche relationships and competition.
3. **Burke (2002):** a) The underlying geology determines the physical properties of the soil; b) soil chemical properties are influenced by underlying geology and probably biogenic processes as well as atmospheric input; c) soil properties are affected by topography and relief but are not influenced by the aspect of the slope. The study also showed that the relief characteristics probably affect the release, redistribution and deposition of nutrients. The role of inselbergs in contributing nutrients to the surrounding plains can be extremely important in maintaining functioning ecosystems and landscapes, as well as a seed reservoir, which is an important aspect to consider in resource conservation and planning. Granite inselbergs showed closer links with nearby mountainous habitats than dolerite ridges. Higher ROs had closer links to mountainous habitats than lower ones. Many species, largely with broad habitat requirements, are shared between inselbergs and potential continental habitats. More transient populations of short-lived species are probably shared between the dolerite ridges and the potential mainland, compared to longer-lived plants on granite inselbergs.

4. **Burke (2003a):** Mesa (tableland) supports different plant communities than the surrounding plains, while slopes indicate varying mixing levels with summit vegetation. Differences between mesas/ summit and plains became more pronounced with increasing elevation. However, no clear vegetation belts related to elevation were observed. Plant species richness and number of mesa/summit specialists tended to increase in numbers with elevation, but these trends were not statistically significant, largely due to high variability among samples. Soil properties evidenced soil gradients. Altitudinal effects expressed by humidity and temperatures influenced plant species composition and richness directly. Soil gradients can also indicate the flow of nutrients from Mesa (tableland) to surrounding lowlands, a process of ecological importance particularly in degraded sites due to overgrazing becomes problematic in lowland areas.
5. **Anthelme, Mato and Maley (2008):** The results indicated that among the 151 species identified, 12 were recorded for the first time in Niger, and 53 were not found in the adjacent lowlands, thus highlighting the true specificity of a mountain. A five-class habitat variable separated a relatively high portion of Saharan-Mediterranean species (8%) located in microhabitats on volcanic rock, and Guinean-Sudanese-Zambezian species (13%) located in microhabitats on granite rock. These two habitats provided local abiotic refuges, which protected a group of aridity relict species and, probably, herbivores. Therefore, species persistence may depend on regional and local abiotic variables.
6. **Bárcenas-Argüello et al. (2010):** The discontinuous distribution of the three species of *Cephalocereus* is not restricted to a calcareous environment. The distribution pattern appears related to specific rock inclusions for each species acting as rocky and edaphic islands. All species studied accumulate biominerals in their tissues, but this does not impact the mineral composition of the soil. The authors reveal that the crystalline forms present in the species do not belong to the same system, and the wide variety of forms must be studied to understand their taxonomic value. Due to the association between parental material and soil preference in the three *Cephalocereus* species studied, the authors state that these factors promoted their endemism; that

is, it is essential to take into account parental material and soil preference associations to understand the endemism of the Cactaceae fully.

7. **Schut *et al.* (2014):** Using granite ROs in the SWAFR as a case study, they found that the vegetation surrounding the ROs included a wide range of structural classes, reflecting differences in local topography, soil depth, and water influx associated with the great diversity of habitats that were found there. In a scenario of reduced rainfall predicted for the region, they identified areas where the vegetation structure could persist for longer, thus providing safe havens for biota under climate change. However, it is recognized that interactions such as fire and declining water tables also influence the response to climate change. Furthermore, the projections are likely conservative, as the current vegetation structure may not yet reflect the major changes in reduced rainfall that occurred in 2000-2010.
8. **Ottaviani, Marcantonio and Mucina (2016):** a) Functional diversification, probably aimed at avoiding intra- and interspecific competition for the acquisition of light and nutrients, maybe the important factor in deep soil (micro)habitats; b) patches of deep soil around granite ROs can serve as ecological microrefuges for biota associated with resource-rich environments.
9. **Yates *et al.* (2019):** The authors recorded 92 families and 1,060 plant species. They compared three types of habitats in granite ROs, namely: herbaceous vegetation in gnamma (HVG); woody vegetation in gnamma (WVG), and woody vegetation in the alluvium-colluvium found around/toeslope of the ROs (WVB). At the plot level, local soil variables that affect aridity were correlated with species richness in herbaceous and woody vegetation of gnammas filled by soil (HVG and WVG), but not woody vegetation in deeper soils at the toeslope of ROs (WVB). At the RO level, bioclimatic variables affecting aridity were correlated with species richness in two habitats (WVG and WVB), but, contrary to predictions from island biogeography, were not correlated with the inselberg area and isolation in either of the three habitats. Species turnover in each of the three habitats was also influenced by aridity, correlated with bioclimatic variables and the geographic distance between the plots, and for the HVG and WVG habitats with local variables. At the RO level, species replacement was the dominant

component of species turnover in the three habitats, consistent with expectations for long-term stable landscapes.

10. **Clark-Ioannou, Wardell-Johnson and Millet (2021)**: The floristic composition of the RO was mainly controlled by the geographical position and topography of the RO (slope and northern aspect), while the diversity of the plant community (richness, abundance, uniformity and diversity of Simpson) was strongly controlled by soil patch size, regardless of RO location or size. ROs with larger soil patches harbored greater plant diversity.
11. **Rafiee *et al.* (2022)**: The results show that changes in soil properties (organic C) most affected taxonomy, functional diversity, and functional characteristics in RO. Whereas similar environmental factors (P, organic C, and precipitation) regulated the taxonomic diversity of ROs and nearby grasslands, functional diversity showed greater drought-adapted traits at the RO community level. These results highlight the important role of microscale (local) environmental factors, such as critical species (keystone species) and microhabitat effects on plant community composition and diversity across environmental gradients.

4.1.6 Discussion

4.1.6.1 Water: the element that connects the (eco)system

Water availability is essential for the development of life on the planet, varying spatio-temporally, especially for regions with arid and semiarid climates (Arca *et al.*, 2021; Huxman *et al.*, 2004). In the context of ROs, specifically, water availability seems to be even more crucial for the occurrence of microhabitats (Ottaviani; Marcantonio; Mucina, 2016; Rafiee *et al.*, 2022; Schut *et al.*, 2014; Yair; Danin, 1980), serving as a kind of “fuel” that interconnects and dictates the dynamics of the (eco)systems observed in ROs.

Precipitation is the main source of water in these environments. Once the rain occurs, part of it will be intercepted by vegetation, another will accumulate in the different microhabitats, while the largest volume will be drained to the toeslope of the ROs. Surface runoff ensures the erosion of mineral and organic particles to the toeslope of the ROs or

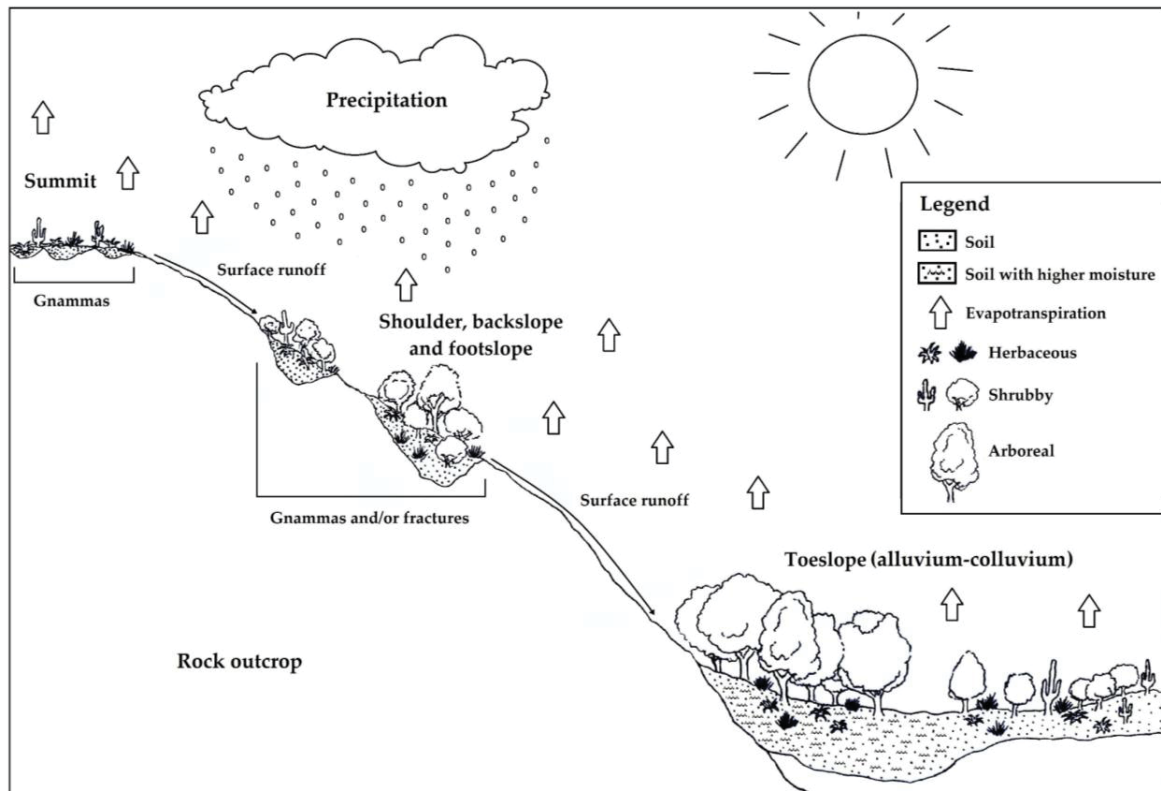
concave surfaces. In these portions, organic acids and water accumulation induce hydrolysis and formation of fine clay and silt-sized particles (Lopez; Bacilio, 2020). Considering that ROs are mainly composed of lithologies with high resistance to weathering, the production of fine material in gnammas, cracks, or at the toeslope of ROs is important for life support (Burke, 2001; 2002; 2003b; Ottaviani; Marcantonio; Mucina, 2016).

Although the studies do not include rain interception by the vegetation canopy and soil water availability data, it is expected that the higher content of soil organic matter increases the field capacity and amount of available soil water to ensure that part of the precipitation persists in the system and nourishes the plants after rainy events and even during the dry season (Emerson; McGarry, 2003; Hudson, 1994; Minasny; McBratney, 2018). The aggregation of mineral and organic particles via wetting/drying cycles and biological activity favors the formation of pores, especially macropores – especially in dry climate environments (Bronick; Lal, 2005; Hirmas *et al.*, 2018). Macropores are responsible for infiltrating meteoric water that will remain stored in the soil, through micropores, or feed the water table. Although the erosion process is complex and has no linear relationship with precipitation, soils with greater vegetation cover and porosity showed less surface runoff and soil erosion (Bronick; Lal, 2005; Hirmas *et al.*, 2018; Jarvis; Larsbo, 2023).

4.1.6.2 Relief-soil-plant interactions at the RO interface

To indicate the establishment of patterns of interactions observed between relief-soil-plant in ROs, this topic was structured in a geomorphic surface logic (Alves *et al.*, 2024; Zinck, 2023), that is, the interpretations were divided into different geomorphic positions, being located in conditions of summit, shoulder, backslope, footslope, and toeslope (alluvium-colluvium), based on a hypothetical scheme of this dynamic (Figure 12).

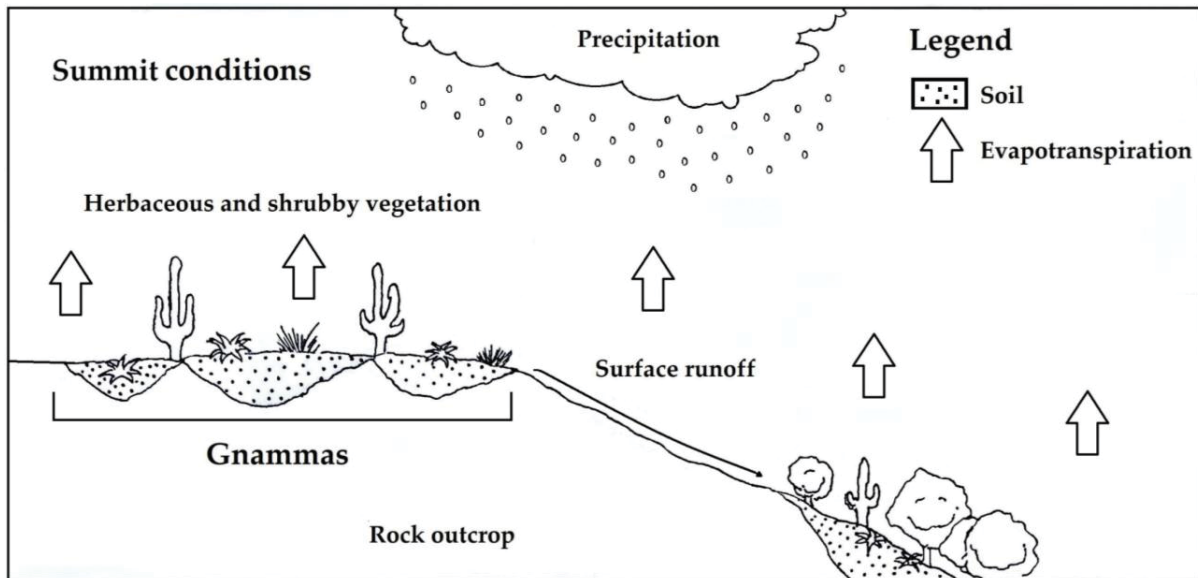
FIGURE 12 - SIMPLIFIED HYPOTHETICAL SCHEME OF THE PHYSICAL-ENVIRONMENTAL DYNAMICS OF ROS IN HOT AND DRY CLIMATE ZONES.



SOURCE: Based on the work of Anthelme, Mato and Maley (2008), Burke (2001, 2002), Clark-Ioannou, Wardell-Johnson and Millet (2021), Ottaviani, Marcantonio and Mucina (2016), Schut *et al.* (2014) and Yates *et al.* (2019). Elaboration by author (2023).

The summit of ROs presents numerous gnammas of variable size and depth. Sediments accumulated in these gnammas can form incipient soils. These soils are, unstable, shallow, and have high porosity due to the gravelly coarse texture (Burke, 2002; Lopez; Bacilio, 2020). Consequently, they are highly susceptible to climatic seasonality, varying between being saturated with water during the rainy season and having humidity below the permanent wilting point during the dry season (Certini *et al.*, 2002). These soil pockets are isolated from each other by extensive areas of rock outcrop. The vegetation is generally herbaceous, with a short life cycle or low shrub (Figure 13) (Anthelme; Mato; Maley, 2008; Clark-Ioannou; Wardell-Johnson; Millet, 2021).

FIGURE 13 - SUMMIT CONDITIONS.

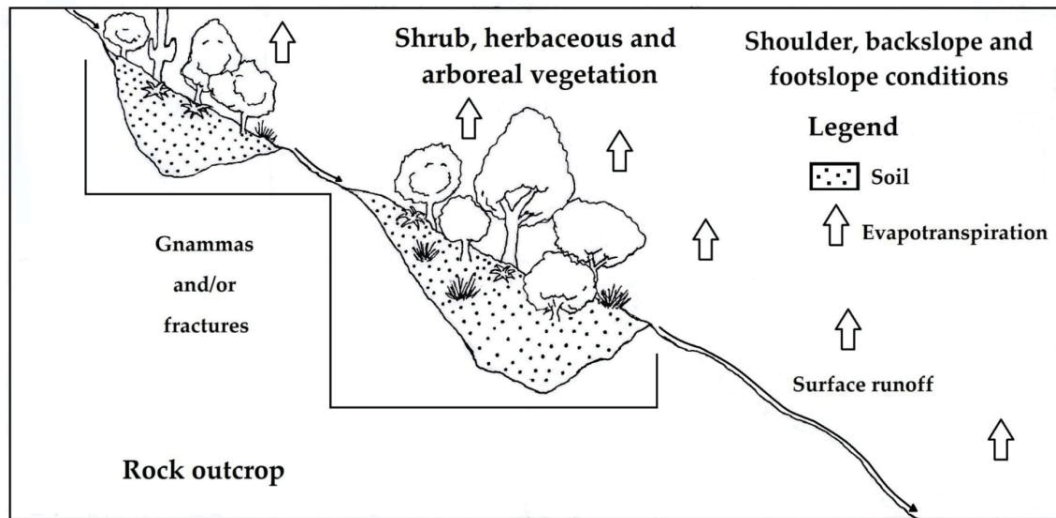


SOURCE: The author (2023).

The shoulder, backslope and footslope, are characterized by housing transitional microhabitats between the summit and toeslope of the ROs. In most cases, microhabitats provided by cracks/faults/fissures and gnammas along the slopes receive moisture, sediments, and nutrients from the top, and consequently, due to gravity, they eventually lose them to the toeslope (alluvium-colluvium) of the ROs. The vegetation consists of annual herbaceous plants, with a dominance of shrubs and, to a lesser extent, trees (Schut *et al.*, 2014; Yates *et al.*, 2019).

Because of this transitional conditions of shoulders, backslopes, and footslopes the environmental conditions are variable, as depending on the morphological characteristics they may present conditions similar to the microhabitats at the summit (shallow soils and smaller vegetation) or enable the occurrence of elements similar to those found at the toeslope of ROs (deep soils and larger vegetation), as represented in Figure 14 (Ottaviani; Marcantonio; Mucina, 2016; Yates *et al.*, 2019).

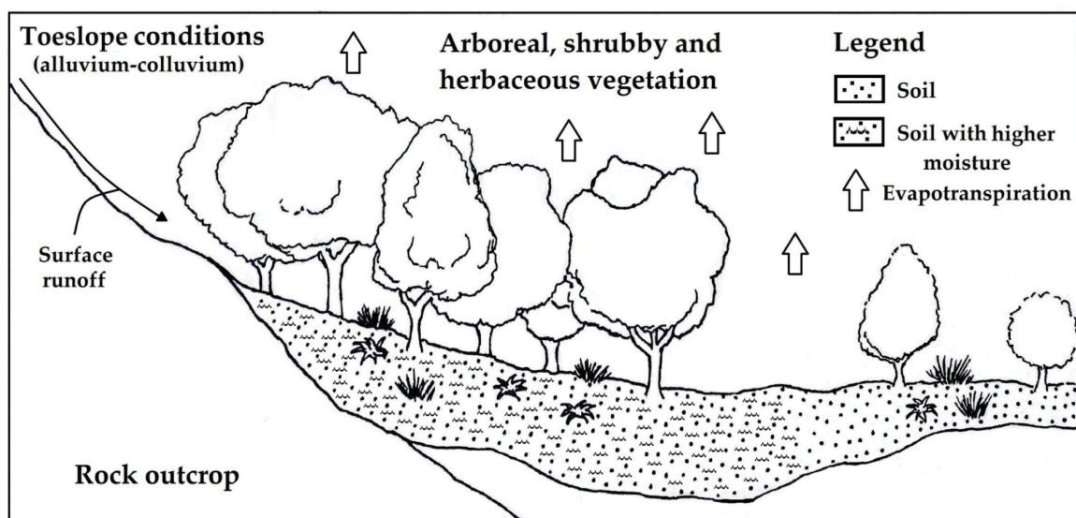
FIGURE 14 - SHOULDER, BACKSLOPE AND FOOTSLOPE CONDITIONS.



SOURCE: The author (2023).

Water runoff from higher altitudes (summit and shoulder, backslope and footslope) accumulates in toeslope and favor deeper soils (Ottaviani; Marcantonio; Mucina, 2016). These features have higher moisture and nutrient contents, especially organic C. The vegetation presents greater continuity and may be denser and taller than in the summit areas and along the slope (Figure 15), or even in the surrounding matrix landscape (Anthelme; Mato; Maley, 2008; Burke, 2001; 2002; Ottaviani; Marcantonio; Mucina, 2016; Schut *et al.*, 2014; Yates *et al.*, 2019).

FIGURE 15 - TOESLOPE CONDITIONS (ALLUVIUM-COLLUVIUM).



SOURCE: The author (2023).

4.1.6.2.1 Synthesis of dynamics in ROs

In summary, the dynamics of precipitation and surface runoff on the hard surface of ROs dictate the redistribution of nutrients, contributing to the diversification of microhabitats on summit, shoulder, backslope, footslope and toeslope (alluvial-colluvial) of ROs (Burke, 2002; Clark-Ioannou; Wardell-Johnson; Millett, 2021). Some of the microhabitats - mainly associated with the toeslope of ROs - alluvium-colluvium (Ottaviani; Marcantonio; Mucina, 2016; Schut *et al.*, 2014) - serve as deposits of nutrients and moisture which, in turn, time, they provide essential inputs for the occurrence of deeper soils and with greater input of organic C, enabling the creation of pockets (soil pockets) rich in resources capable of maintaining relatively stable environmental conditions for long periods (Burke, 2002, 2003a, 2003b; Ottaviani; Marcantonio; Mucina, 2016).

These dynamics analyzed in ROs become even more important when the local microclimate of these microhabitats shows a decoupling effect, mainly observed when the surrounding landscape begins to suffer from periods of drought, some lasting years, while that sheltered microhabitats retain greater humidity (Keppel *et al.*, 2012; Schut *et al.*, 2014). Based on the articles included in this review, it is suggested that the relative environmental stability provided by microhabitats has greater potential in promoting the persistence of diverse functional characteristics than the predominant landscape (Anthelme; Mato; Maley, 2008; Ottaviani; Marcantonio; Mucina, 2016; Yates *et al.*, 2019; Rafiee *et al.*, 2022).

4.1.6.3 ROs as refuges for biodiversity

ROs are ecological refuges since they host species not found in surroundings (Parmentier *et al.*, 2005; Porembski; Seine; Barthlott, 2000). Occurrence of these exclusive species is attributed to speciation and extinction due to past climate changes (Hopper, 2009). Therefore, this set of characteristics ends up giving ROs high paleoenvironmental importance.

ROs are unique relief forms that can be considered as true “land islands” or “exception areas” (Burke, 2003b; Clark-Ioannou; Wardell-Johnson; Millett, 2021;

Porembski; Barthlott, 2000; Rafiee *et al.*, 2022). According to Ottaviani, Marcantonio, and Mucina (2016), due to their high diversity of microhabitats, ROs preserve elements (mainly soils and vegetation) that allow insight into past environmental circumstances (Souza *et al.*, 2022). These characteristics of ROs, in addition to preserving the past, can serve to maintain microhabitats in the future, thus functioning as a kind of refuge for biodiversity (Burke, 2003b; Keppel *et al.*, 2012; Lopes; Ramos; Almeida, 2017; Speziale; Ezcurra, 2014). This is even more important, especially during climate fluctuations (Hampe *et al.*, 2013), directly interfering with the dynamics of water stress (Schut *et al.*, 2014; Yair; Danin, 1980).

In general, Keppel *et al.* (2012) define refuges as sites or microhabitats where species can potentially retreat to less favorable environmental conditions, survive and expand into surrounding landscapes when environmental stress (such as water scarcity) occurs. reduce. Many studies such as those by Keppel *et al.* (2012), Ottaviani, Marcantonio and Mucina (2016), Schmalholz and Hyleer (2011), Schut *et al.* (2014), Yates *et al.* (2019), among many others, consider that the potential of a refuge is intrinsically related to the microclimatic dissociation of predominant regional climate patterns, that is, while the regional climate experiences increasing water stress, ROs could preserve the patterns of previous microclimatic conditions (pre-stress).

Lopes, Ramos and Almeida (2017) also mentioned that the steep slope in ROs promotes greater biodiversity conservation by restricting or hindering human use/access to these environments. Therefore, it is believed that ROs may be capable of mitigating environmental changes (Fitzsimons; Michael, 2017; Keppel *et al.*, 2012) due to the diversification (spatial scale) and stability (temporal scale) of microhabitats related to the decoupling of the local microclimate from the regionally predominant climate (Ottaviani; Marcantonio; Mucina, 2016; Schmalholz; Hyleer, 2011; Schut *et al.*, 2014; Speziale; Ezcurra, 2014), in addition to the high slope in some ROs (Lopes; Ramos; Almeida , 2017).

4.1.6.4 Methodological aspects and knowledge limitations

Through the 11 articles included in this review, associated with other equally relevant works on ROs (e.g.: Keppel *et al.*, 2012; Kulkarni *et al.*, 2022; Porembski, 2007, among others – APÊNDICE A), there is a clear tendency on the part of scholars to focus their research on biological components, and in this case, on vegetation. The word cloud in Figure 10 corroborates this interpretation. Vegetation is considered the thermometer and synthesis of current environmental conditions and one of the most visible landscape elements (Motzkin *et al.*, 1999). Due to the characteristic heterogeneity of ROs, the possibility of finding new species tends to be greater in these areas than in more homogeneous environments (Porembski; Barthlott, 2000; Porembski, 2007), which reinforces the idea of priority for researchers to study the vegetation of ROs. In this regard, advances are considerable and extremely relevant since the identification and subsequent establishment of standards seem increasingly recurrent. However, they are insufficient to explain the complex dynamics in these areas' ecosystems.

This work noted that practically all studies employed some phytosociological vegetation survey in ROs - except Burke (2002). Usually, this procedure precedes a quantification of taxonomic diversity in angiosperms, and functional diversity is analyzed in isolated cases. Funk *et al.* (2017), Rafiee *et al.* 2022 and Zheng *et al.* (2015) reveal that approaches based on functional characteristics are very promising and need to be measured simultaneously with taxonomic diversity to improve the understanding of different environmental variables in structuring biodiversity in ROs and their surrounding landscapes (Loreau, 2000). Lithology, geomorphology, and pedology are less detailed and described succinctly and superficially.

In the case of soil analyses, trenches are not opened to consider the complete profile. This approach only superficial samples and estimates the depth through the averages of random samples, as in the case of Ottaviani, Marcantonio and Mucina (2016). For physical and chemical properties, studies focus on soil particle size and moisture and pH, C, N, P and K, respectively.

The recurrence of using methodological variables such as topographical aspects and geographic position (geomorphological) and phytosociological survey (vegetation)

suggests a preference or even a probable methodological standardization between studies (see Figure 11), even in very distant locations.

Therefore, the importance of adopting an interdisciplinary approach in these studies on ROs is highlighted to improve the understanding of the systemic functioning of these environments. Otherwise, a given variable will be much more investigated and detailed than the others, leading to a fragmented and reductionist understanding of systemic dynamics.

4.1.6.5 Suggestions for future research/analysis

Regarding future research, it is suggested that they consider deepening/verticalizing the understanding of variables that are already widely covered, including other types of analysis, such as:

1. **Climate:** When dealing with predominantly arid to semiarid (hot and dry) climatic environments, which characteristically suffer from high spatio-temporal variability in the distribution of rainfall, it is recommended to analyze the seasonal distribution of precipitation and minimum and maximum temperatures in different environmental gradients (scales), similar to studies carried out by Rafiee *et al.* (2022) in Iran and Yates *et al.* (2019) in Australia.
2. **Geomorphological:** Carry out aerial photogrammetric surveys to generate Digital Elevation Models (DEMs) and Digital Terrain Models (DTMs) to improve the surface detail of the ROs. This makes it possible to calculate the potential surface runoff from these rock surfaces to the lower areas, similar to the study by Lunguinho (2018) in Paraiba, Brazil and Schut *et al.* (2014) in Australia.
3. **Pedological:** There is an urgent need to include data on water availability through soil water retention curves to compare the permanent wilting point and field capacity between ROs and surrounding areas. In addition to measuring available water, such data will allow us to determine the total stocks of C, N, and P, and better understand the role of the Caatinga as a reservoir of C. Measuring the C:N:P relationship will shed light on the regulation of water patterns, vegetation cover (Bui; Henderson, 2013; Fan

et al., 2015), directly reflecting on soil fertility and indirectly on the nutritional status of plants (Wang *et al.*, 2008). Carry out physical-chemical tests to confirm the stability mechanism of soil organic matter (SOM). This can be done through the fractionation of SOM, and then the characterization of its composition (Campos; Machado, 2017), which consequently allows its quality to be identified, being more useful for understanding C cycling in the soil (Campos; Machado, 2017; Cunha; Mendes; Giongo, 2015). Calculating the stocks of C, N and P for each fraction is also possible, as they have different sensitivities to degradation (Fan *et al.*, 2015; Six *et al.*, 2022; Tan *et al.*, 2004). Stable C isotope and radiocarbon analyses are valuable for SOM and litter dynamics studies. According to Longbottom *et al.* (2014) the content of $\delta^{13}\text{C}$ is an indicator of the precursor of the plant type, particularly useful in distinguishing between plants C_3 and C_4 , which may be related to past climatic conditions, being widely used for paleoenvironmental reconstruction studies (Souza *et al.*, 2022; Xiao *et al.*, 2013). Quantifying the pedodiversity of these environments also is an important proposal play significant roles in ecosystem goods and services as well as in human activities (Adhikari; Hartemink, 2016; Bartkowski *et al.*, 2020). This approach provides information that reinforces the indication of priority areas for studies and conservation (Mikhailova *et al.*, 2021).

4.1.7 Conclusions

Based on the literature consulted, the diversification of microhabitats - originating from different lithological, geomorphological, hydrological and pedological conditions - provides biodiversity with relatively safer and more stable shelters, characterizing them as refuges in areas with a dry climate, protecting elements that indicate past temporal conditions, which need to be further and better investigated in an integrated manner.

The analysis revealed the need for systematic interdisciplinary studies to advance knowledge of relief-soil-plant interactions. In general, these studies still prevail in biology and are therefore disciplinary and partial in their integrated reading of functional relationships within the environmental system.

It is suggested that future work delve deeper into analyses of the biotic elements that form these environments, which, in an integrated manner, are the reason for the existence and permanence of existing singularities, of fundamental importance for a better understanding and preservation of these areas, as holders of inherited conditions of the past and with a solid future influence, particularly when thinking in terms of climate change predicted for dry climate environments around the world.

4.1.8 References

- ADHIKARI, K.; HARTEMINK, A. E. Linking soils to ecosystem services - A global review. **Geoderma**, v. 262, p. 101-111, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>.
- ALVES, G. B.; OLIVEIRA, F. S.; SILVA, A. H. N.; SOUZA JUNIOR, V. S. Toposequence: What are we talking about?. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 48, e0230137, 2024. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230137>.
- ANTHELME, F.; MATO, M. W.; MALEY, J. Elevation and local refuges ensure persistence of mountain specific vegetation in the Nigerien Sahara. **Journal of Arid Environments**, v. 72, n. 12, p. 2232-2242, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.07.003>.
- ARCA, V.; POWER, S. A.; DELGADO-BAQUERIZO, M.; PENDALL, E.; OCHOA-HUESO, R. Seasonal effects of altered precipitation regimes on ecosystem-level CO₂ fluxes and their drivers in a grassland from Eastern Australia. **Plant and Soil**, v. 460, p. 435-451, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04811-x>.
- BÁRCENAS-ARGUELLO, M. L.; GUTIERREZ-CASTORENA, M. C.; TERRACE, T.; LOPEZ-MATA, L. Rock-Soil Preferences of Three *Cephalocereus* (Cactaceae) Species of Tropical Dry Forests. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n. 4, p. 1374-1382, 2010. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0310>.
- BARTKOWSKI, B.; BARTKE, S.; HELMING, K.; PAUL, C.; TECHEN, A.; HANSJÜRGENS, B. Potential of the economic valuation of soil-based ecosystem services to inform sustainable soil management and policy. **PeerJ**, v. 8, e8749, p. 1-31, 2020. <https://doi.org/10.7717/peerj.8749>.
- BREMER, H.; SANDER, H. Inselbergs: geomorphology and geoecology. In: Porembski, S.; Barthlott, W. (Eds.) **Inselbergs: Biotic diversity of isolated rock outcrops in tropical and temperate regions**. Berlin, Germany: Springer Verlag, v. 146, 2000. p. 7-35.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, n. 1-2, p. 3-22, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma>.

BUI, E. N.; HENDERSON, B. L. C:N:P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors. **Plant and Soil**, v. 373, p. 553-568, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1823-9>.

BURKE, A. Determinants of inselberg floras in arid Nama Karoo landscapes. **Journal of Biogeography**, v. 28, n. 10, p. 1211-1220, 2001. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2001.00623.x>.

BURKE, A. How special are Etendeka mesas? Flora and elevation gradients in an arid landscape in north-west Namibia. **Journal of Arid Environments**, v. 55, n. 4, p. 747-764, 2003a. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(02\)00293-8](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(02)00293-8).

BURKE, A. Inselbergs in a changing world - global trends. **Diversity and Distributions**, v. 9, n. 5, p. 375-383, 2003b. <https://doi.org/10.1046/j.1472-4642.2003.00035.x>.

BURKE, A. Properties of soil pockets on arid Nama Karoo inselbergs—the effect of geology and derived landforms. **Journal of Arid Environments**, v. 50, n. 2, p. 219-234, 2002. <https://doi.org/10.1006/jare.2001.0907>.

CAMPOS, D. V. B.; MACHADO, P. L. O. A. Physical fractionation of organic matter. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.). **Soil Analysis Methods Manual**. 3rd revised and expanded edition, Brasília-DF: Embrapa, chap. 7, 2017, p. 415-425.

CERTINI, G.; CORTI, G.; UGOLINI, F. C.; DE SIENA, C. Rock weathering promoted by embryonic soils in surface cavities. **European Journal of Soil Science**, v. 53, n. 1, p. 139-146, 2002. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2002.00434.x>.

CLARK-IOANNOU, S. M.; WARDELL-JOHNSON, G. W.; MILLETT, J. Multi-scale biogeographic controls over plant communities on granite outcrops in the Southwest Australian Floristic Region. **Austral Ecology**, v. 46, p. 627-639, 2021. <https://doi.org/10.1111/aec.13018>.

COOPER, A. Plant species coexistence in cliff habitats. **Journal of Biogeography**, v. 24, p. 483-494, 1997. Available at: <https://www.jstor.org/stable/2846166>. Accessed on: 29 March 2025.

CORRÊA, A. C. D. B.; TAVARES, B. D. A. C.; MONTEIRO, K. D. A.; CAVALCANTI, L. C. D. S.; LIRA, D. R. Megageomorfologia e morfoestrutura do Planalto da Borborema. **Revista do Instituto Geológico**, v. 31, n. 1-2, 2010, p. 35-52. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.20100003>.

CUNHA, T. J.; MENDES, A. M. S.; GIONGO, V. Soil organic matter. In: NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. O. (Ed.) **Soil resource: properties and uses**. Editora Cubo, São Carlos, 2015, p. 273-293.

EMERSON, W. W.; MCGARRY, D. Organic carbon and soil porosity. **Australian Journal of Soil Research**, v. 41, n. 1, p. 107-118, 2003. <https://doi.org/10.1071/SR01064>.

FAN, H.; WU, J.; LIU, W.; YUAN, Y.; HU, L.; CAI, Q. Linkages of plant and soil C:N:P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations. **Plant and Soil**, v. 392, p. 127-138, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2444-2>.

EUROSTAT. **Database**. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home>. Accessed on: mar. 25, 2020.

FITZSIMONS, J. A.; MICHAEL, D. R. Rocky outcrops: A hard road in the conservation of critical habitats. **Biological Conservation**, v. 211, n. Part B, p. 36-44, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.11.019>.

FLOURISH. **Data Visualization & Storytelling**. <https://flourish.studio> Accessed on: feb. 20, 2023.

FUNK, J. L.; LARSON, J. E.; AMES, G. M.; BUTTERFIELD, B. J.; CAVENDER-BARES, J.; FIRN, J.; LAUGHLIN, D. C.; SUTTON-GRIER, A. E.; WILLIAMS, L.; WRIGHT, J. Revisiting the Holy Grail: Using plant functional traits to understand ecological processes. **Biological Reviews**, v. 9, n. 2, p. 1156-1173, 2017. <https://doi.org/10.1111/brv.12275>.

GREENHALGH, T.; PEACOCK, R. Effectiveness and efficiency of search methods in systematic reviews of complex evidence: audit of primary sources. **BMJ**, v. 331, 1064-1065, 2005. <https://doi.org/10.1136/bmj.38636.593461.68>.

HIRMAS, D. R.; GIMÉNEZ, D.; NEMES, A.; KERRY, R.; BRUNSELL, N. A.; WILSON, C. J. Climate-induced changes in continental-scale soil macroporosity may intensify water cycle. **Nature**, v. 561, p. 100-103, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0463-x>.

HAMPE, A.; RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, F.; DOBROWSKI, S.; HU, F. S.; GAVIN, D. G. Climate refugia: from the Last Glacial Maximum to the twenty-first century. **New Phytologist**, v. 197, n. 1, p. 16-18, 2013. <https://doi.org/10.1111/nph.12059>

HOPPER, S. D. OCBIL theory: towards an integrated understanding of the evolution, ecology and conservation of biodiversity on old, climatic buffered, infertile landscapes. **Plant and Soil**, v. 322, n. ½, p. 49-86, 2009. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0068-0>.

HUDSON, B. D. Soil organic matter and available water capacity. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 49, n. 2, p. 189-194, 1994. Available at: <https://www.jswnonline.org/content/49/2/189>. Accessed on: 29 March 2025.

HUXMAN, T. E.; SNYDER, K. A.; TISSUE, D.; LEFFLER, A. J.; OGLE, K.; POCKMAN, W. T.; SANDQUIST, D. R.; POTTS, D. L.; SCHWINNING, S. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. **Ecology**, v. 141, p. 254-268, 2004. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1682-4>.

IUCN. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. **A working system for classification of world vegetation**. Morges, Switzerland, 1973, p. 23. Available at: <https://portals.iucn.org/library/node/6572>. Accessed on: 29 March 2025.

JARVIS, N.; LARSBO, M. Macropores and macropore flow. In: GOSS, M. J.; OLIVER, M. (Eds.) **Encyclopedia of Soils in the Environment (Second Edition)**, Elsevier, p. 306-313, 2023. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00098-7>.

KEPPEL, G.; VAN NIEL, K. P.; WARDELL-JOHNSON, G. W.; YATES, C. J.; BYRNE, M.; MUCINA, L.; SCHUT, A. G. T.; HOPPER, S. D.; FRANKLIN, S. E. Refugia: identifying and understanding safe havens for biodiversity under climate change. **Global Ecology and Biogeography**, v. 21, p. 393-404, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00686.x>.

KLUGE, M.; BRULFERT, J. Ecophysiology of vascular plants on inselbergs. In: POREMBSKI, S.; BARTHLOTT, W. (Eds.) **Inselbergs biotic diversity of isolated rock outcrops in tropical and temperate regions**. Ecological Studies, Springer-Verlag, Berlin, v. 146. 2000, p. 143-176.

KULKARNI, A.; SHIGWAN, B. K.; VIJAYAN, S.; WATVE, A.; KARTHICK, B.; DATAR, M. N. Indian rock outcrops: review of flowering plant diversity, adaptations, floristic composition and endemism. **Tropical Ecology**, p. 1-17. 2022. <https://doi.org/10.1007/s42965-022-00283-5>.

LETZ, O. SIEBNER, H.; AVRAHAMOV, N.; EGOZI, R.; ESHEL, G.; DAHAN, O. The impact of geomorphology on groundwater recharge in a semi-arid mountainous area. **Journal of Hydrology**, v. 603, n. Part C, 127029, p. 1-11, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127029>.

Longbottom, T. L.; Townsend-Small, A.; Owen, L. A.; Murari, M. K. Climatic and topographic controls on soil organic matter storage and dynamics in the Indian Himalaya: Potential carbon cycle-climate change feedbacks. **Catena**, v. 119, p. 125-135, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.03.002>.

LOPES, S. F.; RAMOS, M. B.; ALMEIDA, G. R. The Role of Mountains as Refugia for Biodiversity in Brazilian Caatinga: Conservationist Implications. **Tropical Conservation Science**, v. 10, p. 1-12, 2017. <https://doi.org/10.1177/1940082917702651>.

LOPEZ, B. R.; BACILIO, M. Weathering and soil formation in hot, dry environments mediated by plant-microbe interactions. **Biology and Fertility of Soils**, v. 56, n. 4, p. 447-459, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01456-x>.

LOREAU, M. Biodiversity and ecosystem functioning: Recent theoretical advances. **Oikos**, v. 91, n. 1, p. 3-17, 2000. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2000.910101.x>.

LUNGUINHO, R. **Nos caminhos dos relevos residuais contribuição à ecohidrologia de encostas no semiárido brasileiro**. 2018. 267 f. Tese (Doutorado em Geografia) –

Universidade Federal da Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Geografia. João Pessoa, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/13602>.

MIGÓN, P. **Granite landscapes of the world**. Oxford, UK: Oxford University Press. 2006. p. 416. <https://doi.org/10.1093/oso/9780199273683.001.0001>.

MIKHAILOVA, E. A.; ZURQANI, H. A.; POST, C. J.; SCHLAUTMAN, M. A.; POST, G. C. Soil Diversity (Pedodiversity) and Ecosystem Services. **Land**, v. 10, n. 288, p. 1-34, 2021. <https://doi.org/10.3390/land10030288>.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 39-47, 2018. <https://doi.org/10.1111/ejss.12475>.

MOTZKIN, G.; WILSON, P.; FOSTER, D. R.; ALLEN, A. Vegetation patterns in heterogeneous landscapes: The importance of history and environment. **Journal of Vegetation Science**, v. 10, n. 6, p. 903-920, 1999. <https://doi.org/10.2307/3237315>.

OLIVEIRA, R. B.; GODOY, S. A. P. Floristic composition of the rocky outcrops of Morro do Forno, São Paulo. **Biota Neotropica**, v. 7, n. 2, p. 37-48, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1676-06032007000200004>.

ORNDUFF, R. **Islands on Islands: Plant Life on the Granite Outcrops of Western Australia**. University of Hawaii, Honolulu. 1987.

OTTAVIANI, G.; MARCANTONIO, M.; MUCINA, L. Soil depth shapes plant functional diversity in granite outcrops vegetation of Southwestern Australia. **Plant Ecology & Diversity**, v. 9, n. 3, p. 263-276, 2016. <https://doi.org/10.1080/17550874.2016.1211192>.

PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T. C.; MULROW, C. D.; SHAMSEER, L.; TETZLAFF, J. M.; AKL, E. A.; BRENNAN, S. E.; CHOU, R.; GLANVILLE, J.; GRIMSHAW, J. M.; HRÓBJARTSSON, A.; LALU, M. M.; LI, T.; LODER, E. W.; MAYO-WILSON, E.; MCDONALD, S.; MCGUINNESS, L. A.; STEWART, L. A.; THOMAS, J.; TRICCO, A. C.; WELCH, V. A.; WHITHING, P.; MOHER, D. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, n. 71, p. 1-9, 2021. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.

PARMENTIER, I. Study of the vegetation composition in three inselbergs from continental equatorial guinea (western central Africa): effects of site, soil factors and position relative to forest fringe. **Belgian Journal of Botany**, v. 136, n. 1, p. 63-72, 2003. Available at: <https://www.jstor.org/stable/20794516>.

PARMENTIER, I.; STÉVART, T.; HARDY, O. J. The inselberg flora of Atlantic Central Africa. I. Determinants of species assemblages. **Journal of biogeography**, v. 32, p. 685-696, 2005. Available at: <https://www.jstor.org/stable/3566218>

PÉREZ, F. L. Geocology of a granite dome: Spatial interactions between gnammas, rills, soils, and plant cover, Enchanted Rock (Texas, USA). **Catena**, v. 223, p. 106938, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106938>.

PHAM, M. T.; RAJIĆ, A.; GREIG, J. D.; SARGEANT, J. M.; PAPADOPOULOS, A.; MCEWEN, S. A. A scoping review of scoping reviews: advancing the approach and enhancing the consistency. **Res Synth Methods**, v. 5, n. 4, p. 371-385, 2014. <https://doi.org/10.1002/jrsm.1123>.

POREMBSKI, S. Tropical inselbergs: habitat types, adaptive strategies and diversity patterns. **Brazilian Journal of Botany**, v. 30, n. 4, p. 579-586, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-84042007000400004>.

POREMBSKI, S.; BARTHLOTT, W. (Eds.) **Inselbergs biotic diversity of isolated rock outcrops in tropical and temperate regions**. Ecological Studies, Springer-Verlag, Berlin, v. 146. 2000. p. 556.

POREMBSKI, S.; MARTINELLI, G.; OHLEMÜLLER, R.; BARTHLOTT, W. Diversity and ecology of saxicolous vegetation mats on inselbergs in the Brazilian Atlantic rainforest. **Diversity and Distributions**, v. 4, n. 3, p. 107-119, 1998. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.1998.00013.x>.

POREMBSKI, S.; SEINE, R.; BARTHLOTT, W. Factors controlling species richness of inselbergs. In: POREMBSKI, S.; BARTHLOTT, W. (Eds.) **Inselbergs biotic diversity of isolated rock outcrops in tropical and temperate regions**. Ecological Studies, Springer-Verlag, Berlin, v. 146. 2000, p. 451-481.

RAFIEE, F.; EJTEHADI, H.; FARZAM, M.; ZARE, H.; BASHIRZADEH, M. Changes in plant biodiversity facets of rocky outcrops and their surrounding rangelands across precipitation and soil gradients. **Scientific Reports**, v. 12, p. 1-11, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13123-2>.

SARTHOU, C.; PAVOINE, S.; GASC, J. P. D.; MASSARY, J. C.; PONGE, J. F. From inselberg to inselberg: Floristic patterns across scales in French Guiana (South America). **Flora**, v. 229, p. 147-158, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2017.02.025>.

SCHMALHOLZ, M.; HYLANDER, K. Microtopography creates small-scale refugia for boreal forest floor bryophytes during clear-cut logging. **Ecography**, v. 34, n. 4, p. 637-648, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2010.06652.x>.

SCHUT, A. G. T.; WARDELL-JOHNSON, G. W.; YATES, C. J.; KEPPEL, G.; BARAN, I.; FRANKLIN, S. E.; HOPPER, S. D.; VAN NIEL, K. P.; MUCINA, L.; BYRNE, M. Rapid Characterisation of Vegetation Structure to Predict Refugia and Climate Change Impacts across a Global Biodiversity Hotspot. **PLoS ONE**, v. 9, n. 1, e82778, p. 1-15, 2014. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082778>.

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, v. 241, p. 155-176, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>.

SOUZA, J. J. L. L.; SOUZA, B. I.; XAVIER, R. A.; CARDOSO, E. C. M.; MEDEIROS, J. R.; FONSECA, C. F.; SCHAEFER, C. E. G. R. Organic carbon rich-soils in the brazilian semiarid region and paleoenviromental implications. **Catena**, v. 212, 106101, p. 1-14, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106101>.

SOUZA, N. R. L.; LIMA, V. R. P.; XAVIER, R. A. Mapeamento e caracterização de trilhas na Fazenda Salambaia como subsídio ao desenvolvimento do Geoturismo e da Geoconservação no semiárido paraibano. **Revista da ANPEGE**, v. 18, n. 36, p. 76-97, 2022. <https://doi.org/10.5418/ra2022.v18i36.15922>.

SPEZIALE K. L.; EZCURRA, C. Rock outcrops as potential biodiversity refugia under climate change in North Patagonia. **Plant Ecology & Diversity**, v. 8, n. 3, p. 353-361, 2014. <https://doi.org/10.1080/17550874.2014.983200>.

SZARZYNSKI, J. Xeric islands: environmental conditions on inselbergs. In: POREMBSKI, S.; BARTHLOTT, W. (Eds.) **Inselbergs biotic diversity of isolated rock outcrops in tropical and temperate regions**. Ecological Studies. Springer-Verlag, Berlin, v. 146, 2000. p. 37-48.

TAN, Z. X.; LAL, R.; SMECK, N. E.; CALHOUN, F. G. Relationships between surface soil organic carbon pool and site variables. **Geoderma**, v. 121, n. 3-4, p. 187-195, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.11.003>.

TWIDALE, C. R. The two-stage concept of landform and landscape development involving etching: origin, development and implications of an idea. **Earth-Science Reviews**, v. 57, n. 1-2, p. 37-74, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00059-9](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00059-9).

TWIDALE, C. R.; ROMANI, J. R. V. **Landforms and Geology of Granite Terrains**. Taylor & Francis Group plc, London, UK, 2005. p. 330.

WANG, Q.; SHIXIONG, L.; ZENGCHUN, J.; WENYING, W. Response of carbon and nitrogen content in plants and soils to vegetation cover change in alpine Kobresia meadow of the source region of Lantsang, Yellow and Yangtze Rivers. **Acta Ecologica Sinica**, v. 28, n. 3, p. 885-894, 2008. [https://doi.org/10.1016/S1872-2032\(08\)60031-1](https://doi.org/10.1016/S1872-2032(08)60031-1).

XIAO, L.; YANG, H.; SUN, B.; LI, X.; GUO, J. Stable isotope compositions of recent e fossil sun/shade leaves e implications for palaeoenviromental reconstruction. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 190, p. 75-84, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2012.10.002>.

YAIR, A., DANIN, A. Spatial variations in vegetation as related to the soil moisture regime over an arid limestone hillside, northern Negev, Israel. **Ecology**, v. 47, p. 83-88, 1980. <https://doi.org/10.1007/BF00541779>.

YATES, C. J.; ROBINSON, T.; WARDELL-JOHNSON, G. W.; KEPPEL, G.; HOPPER, S. D.; SCHUT, A. G. T.; BYRNE, M. High species diversity and turnover in granite inselberg floras highlight the need for a conservation strategy protecting many outcrops. **Ecology and Evolution**, v. 9, p. 7660-7675, 2019. <https://doi.org/10.1002/ece3.5318>.

ZACHOS, F. E.; HABEL, J. C. (Eds.) **Biodiversity Hotspots: Distribution and Protection of Conservation Priority Areas**. Springer Berlin, Heidelberg, 2011. p. 546. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20992-5>.

ZHAO, Z.; SHEN, Y.; JIANG, R.; WANG, Q. Rock outcrops change infiltrability and water flow behavior in a karst soil. **Vadose Zone Journal**, v. 19, n. 1, e20002, p. 1-15, 2019. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20002>.

ZHENG, S.; LI, W.; LAN, Z.; REN, H.; WANG, K. Functional trait responses to grazing are mediated by soil moisture and plant functional group identity. **Scientific Reports**, v. 5, 18163, p. 1-12, 2015. <https://doi.org/10.1038/srep18163>.

ZHU, X.; SHEN, Y.; HE, B.; ZHAO, Z. Humus soil as a critical driver of flora conversion on karst rock outcrops. **Scientific reports**, v. 7, p. 12611, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13060-5>.

ZINCK, J. A. The Geomorphic Landscape: Classification of Geoforms. In: Zinck, J. A.; Metternicht, G.; del Valle, H. F.; Angelini, M. (Eds) **Geopedology: An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies**. Springer, Cham, 2023, p. 107-131. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20667-2_7.

5. GÊNESE DE SOLOS DE BOLSÕES EM INSELBERGS NA CAATINGA

Este capítulo apresenta os principais processos pedogenéticos identificados nos “bolsões” de solos situados em ambientes de acumulação ao longo ou adjacentes as encostas rochosas dos inselbergs. Foram comparados uma série propriedades (morfológicas, físicas e químicas) de perfis de solo nessas condições apresentadas anteriormente, com perfis de solos tipicamente encontrados na matriz paisagística predominante da Caatinga. As diferenças entre esses grupos de solos são nítidas e refletem a importância da água (item 5.1) na ocorrência de espécies sensíveis a escassez hídrica oriundas de biomas mais úmidos.

O capítulo aqui apresetado foi submetido ao periódico *Pedosphere* e se encontra em processo de revisão desde 14 de novembro de 2024. Esse periódico fundado em 1991, tem um escopo, em geral, voltado para os estudos da ciência do solo. Além de ser amplamente reconhecido internacionalmente, possui CiteScore de 11.7 e fator de impacto de 5.2.

5.1 SOILS FORMED IN INSELBERGS HOST DROUGHT-SENSITIVE SPECIES IN THE BRAZILIAN SEMIARID

5.1.1. Abstract

Inselbergs are important for maintaining biodiversity in drylands. This biodiversity is connected to fragile pocket soils in gnammas and faults. The present study aims to analyze the soil genesis in granite inselbergs in the Brazilian semiarid region. We described and characterized 21 soil profiles in granitic environments and 10 in other lithologies, emphasizing chemical and physical properties, soil C, N, and P stocks, and isotopic signatures. The results showed that the soils of the granitic inselbergs field (GIF) are acidic, dystrophic, and more developed, while the typical soils of the Caatinga range from moderately acidic to moderately alkaline, eutrophic, and incipient. The organic carbon contents of GIF soils are up to 5 times higher than those observed in Caatinga soils. The isotopic signature of organic compounds indicates humid conditions throughout the soil pedogenetic process in the GIF. It is considered that granite inselbergs produce

greater soil diversity, according to the geomorphological arrangement, and contribute to the formation of soils with characteristics different from those expected for the current semiarid climate.

Keywords: Caatinga; Bornhardt; dry forests; isotopic signature; granitic bodies.

5.1.2 Introduction

Granitic bodies are one of the most common lithological constituents on the planet, and the breadth of their distribution in different climates and biomes (Migon, 2006; Twidale; Vidal Romaní, 2005). Granitic inselberg fields (GIFs) are more common in tropical and subtropical regions, especially in arid and semiarid climate environments (Burke, 2002; Matmon *et al.*, 2013; Migon, 2006; Twidale, 2002), presenting high biological importance (Burke, 2001; Keppel *et al.*, 2012; Porembski; Barthlott, 2000).

The higher elevation in relation to its surroundings and low porosity, govern the flow of water, sediments, nutrients, and organic residues to gnammas, cracks/fissures, and mainly to the surroundings of the outcrops, constituting depositional and recharge zones water (Burke, 2002; Lunguinho, 2018; Meyer *et al.*, 2021; Ottaviani *et al.*, 2016; Pérez, 2023). These areas provide favorable conditions for the growth of drought-sensitive plant species (Burke, 2002, 2001; Clark-loannou *et al.*, 2021; Porembski; Barthlott, 2000) and the development of soil with high carbon stock (Lunguinho, 2018; Meyer *et al.*, 2021; Pérez, 2023). According to the literature, this pattern is repeated for areas with climatic predominance ranging from arid to semi-arid around the globe, such as in Australia (Clark-loannou *et al.*, 2021; Ottaviani *et al.*, 2016; Schut *et al.*, 2014; Yates *et al.*, 2019), in Brazil (Souza *et al.*, 2022; Lunguinho, 2018), in the United States (Meyer *et al.*, 2021; Pérez, 2023), in Namibia (Burke, 2002, 2001), and in Niger (Anthelme *et al.*, 2008).

Although GIFs are widely covered in scientific literature, few are willing to study the genesis of soils in these areas (Souza *et al.*, 2022; Meyer *et al.*, 2021). In general, research has focused on: a) understanding the genetic-evolutionary aspects of the forms that characterize the different granitic morphologies (Maia; Nascimento, 2018; Matmon *et*

al., 2013; Souza *et al.*, 2023); b) its appreciation of its heritage (Migoñ; Maia, 2020; Souza *et al.*, 2024); and c) analyze the importance exerted by the different microhabitats inserted in the inselbergs in the constitution of highly specialized or rare microenvironments (Porembski; Barthlott, 2000) that can function as biodiversity refuges, by protecting environmental conditions that diverge from the predominant landscape matrix (Souza *et al.*, 2022; Keppel *et al.*, 2012).

Erosion rates on granitic inselbergs are up to four times greater than in the surrounding landscape (Matmon *et al.*, 2013). The frequent and intense erosion of the surface horizon creates soils with low soil organic carbon content, high bulk density, and low permeability (Burke, 2002). Besides erosion, pedogenesis in the GIF is influenced by their morphology and differential weathering (Burke, 2002; Meyer *et al.*, 2021; Ottaviani *et al.*, 2016). Since the parent material is associated with the same lithology, nutrient availability should not be a variable factor. However, the distribution of water and sediments across the topography and biological interactions dictate the production and cycling of organic compounds. This combination interferes with the physical and chemical properties of the soil and governs carbon storage, water availability, and vegetation distribution (Clark-Ioannou *et al.*, 2021; Ottaviani *et al.*, 2016; Pérez, 2023; Schut *et al.*, 2014).

The soil pockets in inselbergs are refuges for species migration and in the preservation/maintenance of functional ecosystems (Burke, 2002, 2001; Keppel *et al.*, 2012). Floristic composition in Australian and African inselbergs is mainly controlled by geographic position, topography, and elevation, while plant community composition is strongly controlled by the depth and size of soil patches, regardless of the location or size of inselbergs (Burke, 2001; Clark-Ioannou *et al.*, 2021). Granite inselbergs with greater patches and soil depths are normally associated with the surrounding rocky slopes and host the greatest plant diversity and larger individuals (Ottaviani *et al.*, 2016).

The Brazilian semiarid region presents an expressive spatial distribution of granite morphologies (Lages *et al.*, 2018, 2013; Maia; Nascimento, 2018; Migoñ; Maia, 2020; Souza *et al.*, 2023; Souza *et al.*, 2024). The exposure of lithologies of different mineralogical compositions and crystal sizes influences the occurrence of different types

of granite morphologies in this (Bastos *et al.*, 2021; Corrêa *et al.*, 2010; Maia; Nascimento, 2018).

Felsic dikes in granitic inselbergs in the Brazilian semiarid region play an essential role in the evolution of granitic terrains. Differences in mineralogical composition, structure, and mechanical strength control the fracturing of the rock mass along the dike walls (Souza *et al.*, 2023). The fractures favor weathering, accumulation of water, organic and mineral particles, and host pocket soils in a neighborhood dominated by rock outcrops. These GIFs have been listed as areas with potential for tourism and biodiversity conservation (Costa *et al.*, 2023; Migoñ; Maia, 2020; Souza *et al.*, 2024).

The Caatinga is the predominant phytogeographic domain in the semiarid region and consists of the largest block of Tropical Dry Forest in South America, occupying around 862.818 km² (Beuchle *et al.*, 2015; IBGE, 2019). The Caatinga covers 10.1% of the Brazilian territory. It is predominantly composed of xerophytic, woody, thorny, and deciduous phytophysognomies that dominate flat surfaces in a hot and dry climate for at least 14.000 years before the present (Queiroz *et al.*, 2017). It is home to 27 million people (IBGE, 2019) and over 2.000 vascular plants, fish, reptiles, amphibians, birds, and mammals (Queiroz *et al.*, 2017). Caatinga soils are generally more incipient, shallow, moderately acidic to moderately alkaline, eutrophic, and dry in most parts of the year, with low levels of organic carbon and less developed than soils in humid tropical regions of Brazil (Araújo Filho *et al.*, 2023).

Scarce studies aim to understand the genesis and evolution of soils in GIFs (Meyer *et al.*, 2021). Understanding soil formation in these severe conditions is essential to conserving the genetic reserve for the reforestation of degraded areas around the world (Burke, 2002, 2001) and may be especially important for the Caatinga (Queiroz *et al.*, 2021; Lunguinho, 2018). In this study, we will analyze the genesis of soils associated with GIF in the driest portion of the Caatinga and their influence on the surrounding vegetation. The results of this research advance knowledge of soil distribution patterns, vegetation, water availability, and management of drylands. Such results highlight the importance of GIF in mitigating the advance of desertification and climate change in the semiarid Caatinga domains.

5.1.3 Materials and Methods

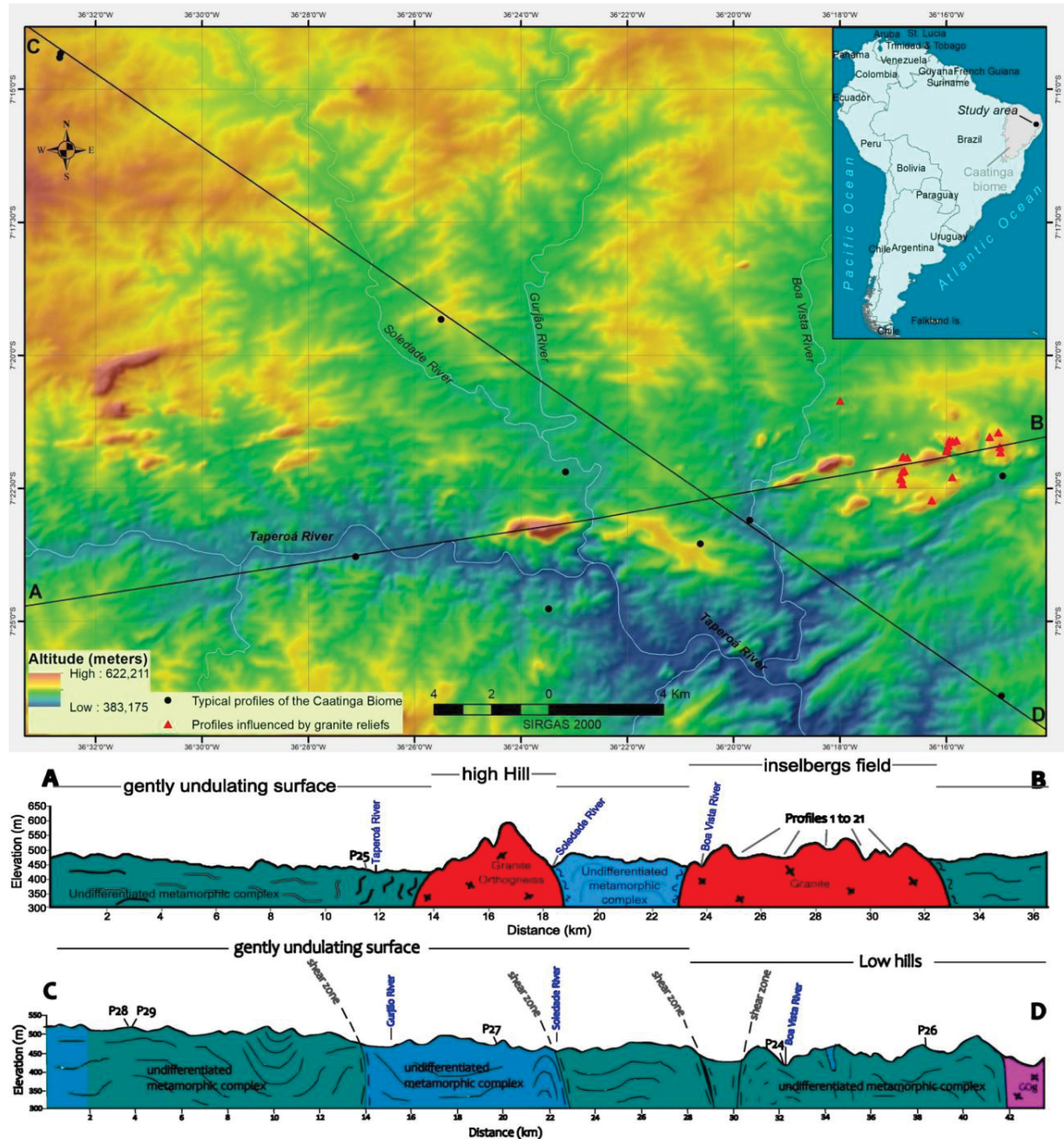
5.1.3.1 Study area

The study area is a granite inselberg field located in the Northeast region of Brazil, in the Caatinga biome (Figure 16). The predominant climate is semiarid (Bsh), with a short rainy season in summer, according to the Köppen classification (Ballén *et al.*, 2016). The mean annual precipitation is 418 mm (DCA-UFCG, 2020), and the mean air temperature is 27°C, with 2.800 hours of sunlight and 50% relative humidity (Nascimento *et al.*, 2014). Such conditions induce potential evapotranspiration four times greater than precipitation, resulting in severe semiaridity with up to eight months of dry season (Kayano; Andreoli, 2009). This region is the driest in the Caatinga and Brazil (Prado, 2003).

The vegetation cover comprises shrub species, particularly pioneers, characterizing a largely anthropized landscape (Silva *et al.*, 2017). In general, it is dominated by species such as *Aspidosperma pyrifolium* (Pereiro), *Jatropha molíssima* (Pinhão Bravo), *Xiquexique gounellei* (Xique-Xique), and *Prosopis juliflora* (Algaroba) (Souza *et al.*, 2015).

Gentle hills separated by extensive flat valleys (Souza *et al.*, 2024; Xavier, 2021) dominate the landscape. The flat relief is cut by monzo biotite/syenogranites of gray color, coarse phaneritic to porphyritic texture with K-feldspar megacrystals of up to 2 cm, allocated between two conjugate shear zones NE-SW and E-W (Lages *et al.*, 2016, 2013). This intrusive magmatic body crystallized around 580 M.a., undergoing successive phases of uplift and metamorphism between the Jurassic and Cretaceous, favored by extensive regional uplift, related to the event, which fragmented the supercontinent Pangea (Lages *et al.*, 2016, 2013).

FIGURE 16 – STUDY AREA LOCATION AND DISTRIBUTION OF SOIL PROFILES ACCORDING TO RELIEF AND LITHOLOGY. TYPICAL CAATINGA SOILS ARE IN BLACK DOTS AND GIF SOILS ARE IN RED TRIANGLES.



SOURCE: CPRM (2021), Neal and Hawker (2023). Elaboration by author (2024).

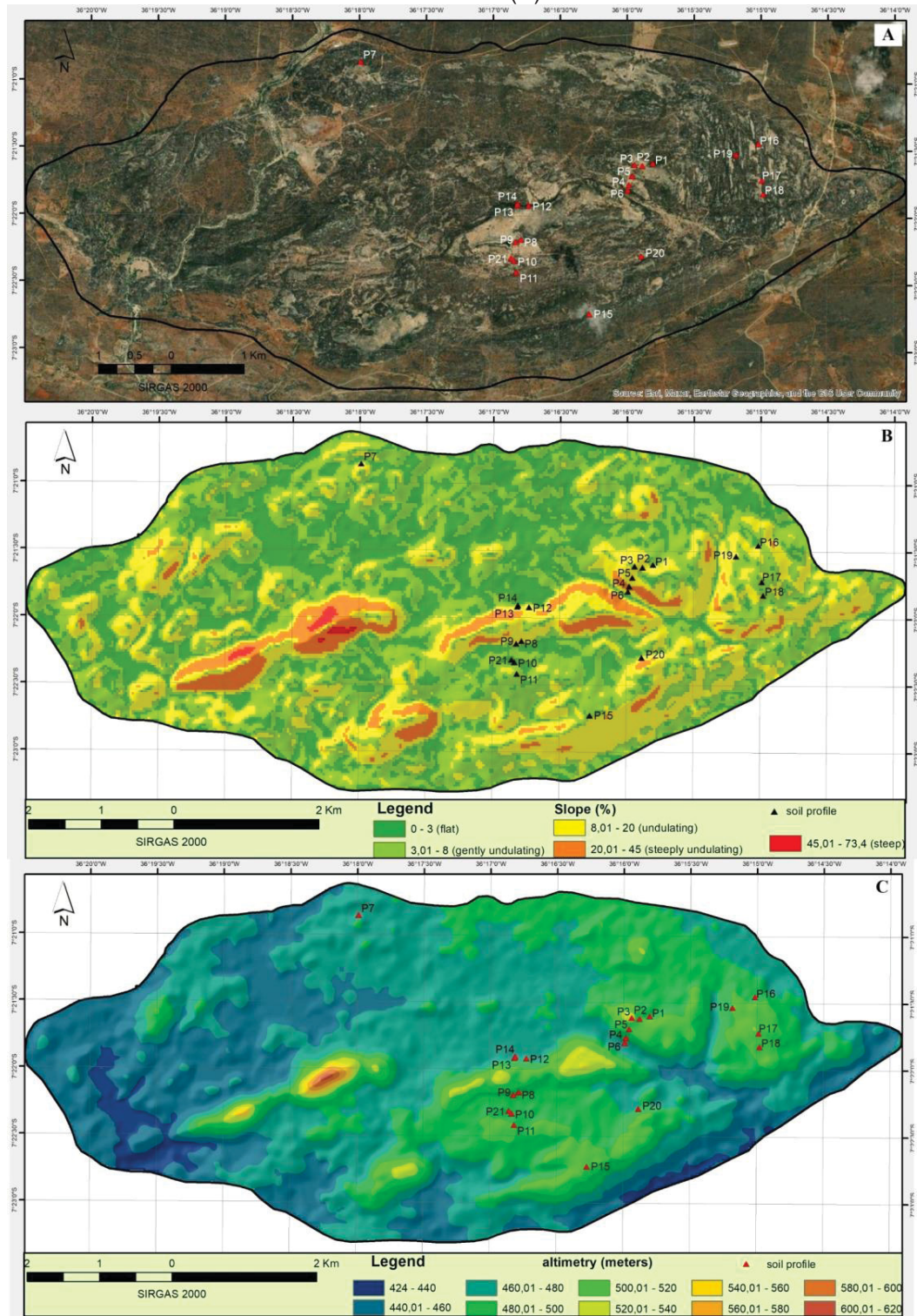
The higher resistance of these rocks favors differential weathering and erosion, highlighting the intrusive rocks (Lages *et al.*, 2018; Souza *et al.*, 2024). Among the granite inselbergs, the asymmetrical domical forms of the whaleback type stand out (Souza; Xavier,

2017). These forms, referred to in Brazil as 'lajedos', are bornhardt-type inselbergs, with a greater area of exposed rock surfaces than the altimetric range (Lages *et al.*, 2013). Gnammas are formed on the rock surface by weathering and relaxation/flaking processes (Souza *et al.*, 2024; Twidale; Bourne, 2018; Twidale; Vidal Romaní, 2005). In general, gnammas are the dominant features in the upper part of the inselbergs, occurring both as closed and open forms or in coalescence (Souza *et al.*, 2024; Souza; Xavier, 2017). Gnammas have various sizes, ranging from a few centimeters to tens of meters in diameter. The studied pluton occupies an area of approximately 40 km² in an ellipsoidal shape, 12 km long and 5 km wide (Figure 17).

In environments with a predominance of Neoproterozoic granites and feldspar-rich granitoids, Leptosols (Neossolos Litólicos, 34% of the total area), Regosols (Neossolos Regolíticos, 9%) and Cambisols (Cambissolos, 1%) dominate. Areas with gneisses and schists associated with broad and smooth hills dominate the Luvisols (Luvissolos, 22%) and Acrisols (Argissolos, 19%). In periodically flooded river valleys, Planosols (Planossolos, 13%) and Vertisols (Vertissolos, 1%) are mainly found, according to (Santos *et al.*, 2011).

This region has a history of ancient occupation dating back to the last 2 kyr, which has intensified since European colonization in the 17th century (Souza; Souza, 2016). Anthropogenic activities such as extensive deforestation, livestock farming, and agriculture are mainly responsible for this region being one of the most critical centers of desertification in Brazil (Souza *et al.*, 2015; Tomasella *et al.*, 2018).

FIGURE 17 - DISTRIBUTION OF GIF SOIL PROFILES ON SATELLITE IMAGE (A), SLOPE (B) AND ELEVATION (C).



SOURCE: Neal and Hawker (2023). Elaboration by author (2024).

5.1.3.2 Soil sampling and analysis

Twenty-one soil profiles were opened, described, and sampled to represent different geomorphic positions of the granitic inselbergs. Another 10 soil profiles were surveyed to represent typical Caatinga soils. Diagnostic horizons, attributes, and properties were identified according to the morphological description (color, texture, structure, consistency, thickness, pores, and roots). Sample collections were carried out to represent each horizon from the surface to the lithic contact in each profile (IBGE, 2015). The profiles were classified according to the World Reference Base Soil Classification System (IUSS Working Group WRB, 2022) and the Brazilian Soil Classification System (Santos *et al.*, 2018). It's important to emphasize that the interpretations made in this manuscript are based on the WRB premises.

The collected samples were air-dried and sieved through a 2 mm sieve before chemical and texture analyses according to methods established for tropical soils (Teixeira *et al.*, 2017). The contents of coarse sand, fine sand, silt, and clay were determined by the pipette method after shaking for 16 h with 0.1 M NaOH (Teixeira *et al.*, 2017).

Soil pH was measured with a glass electrode in a 1:2.5 v/v suspension of soil and deionized water (H₂O pH) and 1 M KCl solution (KCl pH). Delta pH was calculated as: $\Delta\text{pH} = \text{KCl pH} - \text{H}_2\text{O pH}$. Potential acidity (H + Al) was extracted by 1 M ammonium acetate solution at pH 7. The exchangeable Ca²⁺, Mg²⁺, and Al³⁺ content were determined in a 1 M KCl extract. Exchangeable K⁺ and Na⁺ contents were determined after extraction with Mehlich-1. From these results, the sum of bases (SB), base saturation (V), aluminum saturation (m), effective cation exchange capacity (t), cation exchange capacity at pH 7 (T), and Na saturation (NaS) were calculated.

The available phosphorus (P) content was determined by a Mehlich-1 extraction solution. Total organic carbon (C) was determined by wet combustion (Yeomans and Bremner, 1988). The total Nitrogen (N) content was determined using the Kjeldahl method (Teixeira *et al.*, 2017). The carbon/nitrogen ratio (C/N) was calculated by mass. The P (phosphorus) adsorption capacity of the soil was determined after stirring for 1 hour with 2.5 g of soil in 0.01 M CaCl₂ containing 60 mg of P L⁻¹. The suspension was filtered, and

the P remaining in the solution (P_{REM}) was determined by photocolorimetry (Alvarez *et al.*, 2000).

Soil density was determined in undisturbed samples collected by 100 cm³ volumetric rings (Teixeira *et al.*, 2017). Particle density was calculated after drying a quantity of soil at 105°C and then dividing the mass by the volume of the particles, excluding the spaces between them. Total porosity is inferred using the formula: Total porosity (dm³ dm⁻³) = 1 - (soil density/particle density).

Soil organic C, total N, and bioavailable P stocks were calculated using the total content of each element, sampling depth, and soil density: Stock (Mg ha⁻¹) = total organic carbon content (total N or bioavailable P) (g kg⁻¹) x soil density (kg dm⁻³) x thickness of the layer considered (cm) / 10 (Fernandes; Fernandes, 2008). The isotopic composition of C and N in soil and litter was measured from soil samples collected at 10 cm intervals, and composite litter samples. All preparation and dosing procedures were carried out at the Stable Isotope Center of the Universidade Estadual Paulista (CIE/UNESP).

The composition of the plant community was identified at each site. The vegetation survey followed the Free Walking method (Filgueiras *et al.*, 1994). We also consulted Flora and Fungi of Brazil (2024) to review the species and the relationship with their original biomes of occurrence.

5.1.3.3 Statistical analysis

We used Principal Component Analysis (PCA) to identify the correlation between the variables. PCA is a variable reduction method that produces fewer artificial, uncorrelated variables called Principal Components (PCs). PCs are listed in descending order of variance explained in the data. Prior to PCA, analytical data were log-transformed and standardized (Hinton, 2014). All procedures were performed using STATISTICA 8.0® software.

5.1.4 Results

All profiles are positioned at altitudes ranging from 433 to 525 m, and predominantly in flat or gentle slopes (Table 2). The Regosols were described between the summit and toeslope of inselbergs, as well as in gnammas. The Leptosols were identified a few tens of meters (≤ 4) further from the rocky slopes than Regosols. The Cambisols were predominantly observed at the toeslope of inselbergs. A Umbrisol was described in the portion where fractures in the pluton are concentrated. The N-S fractures allowed the formation of clouds filled with sediments interspersed by rock noses, parallel to each other. A Vertisol profile was found in a periodically flooded lagoon. The Vertisol and Umbrisol profiles are positioned in locally concave areas at the toeslope of inselbergs that accumulate sediments, biogenic materials, and water more frequently than other soils.

The vegetation cover in GIFs sites is dense and diverse, generally including specimens of subevergreen tree species, except in the Leptosol (APÊNDICES B, C and D). On the other hand, in the context of the typical Caatinga, the vegetation cover is rare, consisting of annual herbaceous species, with some shrubs and deciduous trees.

TABLE 2 - GENERAL DESCRIPTION OF THE SITES.

Soil profile	WRB	SiBCS	Coordinates	Altitude (m)	General description
<i>GIF soils</i>					
P1	Someric Umbrisol (Pantoloamic, Humic, Raptic)	NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico típico	7°21'36.08"S 36°15'48.32"W	500	Profile on the toeslope of a rocky slope. Well-drained soil, without apparent erosion and derived from autochthonous granitoid colluvium. The soil is covered by litter. <i>Colicodendron yco</i> , <i>Croton blanchetianus</i> , <i>Hymenaea rubriflora</i> , <i>Myrcia tomentosa</i> and <i>Myroxylon peruiferum</i> predominate. Occurrence of the umbric horizon (WRB) and the moderate A horizon (SiBCS).
P2	Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Hyperdystric, Humic, Raptic)	NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico	7°21'37.26"S 36°15'52.96"W	513	Profile in a gnamma located on the backslope of a rocky slope. The soil is well drained, without apparent erosion and derived from autochthonous granitoid colluvium. The soil is covered by litter. <i>Croton blanchetianus</i> , <i>Handroanthus impetiginosus</i> , and <i>Zanthoxylum rhoifolium</i> predominate. Occurrence of the umbric horizon (WRB), the hystic O horizon and the humic A horizon (SiBCS).
P3	Dystic Regosol (Pantoloamic, Humic)	NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico	7°21'36.78"S 36°15'56.55"W	523	Profile on the summit of a rocky slope. The soil is well-drained, with slight laminar erosion, and derived from autochthonous granitoid. The soil is slightly covered by litter. <i>Bromelia laciniosa</i> , <i>Pilosocereus pachycladus</i> , and <i>Sida galheirensis</i> predominate. Occurrence of the moderate A horizon (SiBCS).
P4	Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Hyperdystric, Humic, Raptic)	NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico	7°21'45.68"S 36°15'59.04"W	479	Profile in a gnamma on the footslope of the rocky slope. The soil is well-drained, without apparent erosion, and derived from autochthonous granitoid colluvium. The soil is covered by litter. <i>Commiphora leptophloeos</i> , <i>Erythrina velutina</i> , <i>Handroanthus impetiginosus</i> , and <i>Senna maritima</i> predominate. Occurrence of the humic horizon (WRB) and the humic A horizon (SiBCS).
P5	Dystic Regosol (Pantoloamic, Humic, Raptic)	NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico	7°21'41.89"S 36°15'57.62"W	503	Profile on the shoulder of the rocky slope. The soil is well-drained, with laminar erosion varying from slight to moderate, and derived from autochthonous granitoid colluvium. The soil is slightly covered by litter. <i>Croton blanchetianus</i> , <i>Sida galheirensis</i> , <i>Tacinga inamoena</i> , <i>Tacinga palmadora</i> , and <i>Xiquexique gounellei</i> predominate. Occurrence of the moderate A horizon (SiBCS).
P6	Cambic Someric Umbrisol (Pantoloamic, Humic, Panpaic)	CAMBISSOLO HUMICO Distrófico típico	7°21'48.11"S 36°15'59.60"W	469	Profile on the toeslope of a rocky slope. Poorly drained soil, without apparent erosion and derived from autochthonous granitoid colluvium. The soil is covered by litter. <i>Croton blanchetianus</i> , <i>Croton heliotropifolius</i> , <i>Handroanthus impetiginosus</i> , <i>Hymenaea rubriflora</i> , <i>Pisonia ambigua</i> ,

Continue

Continuation

Soil profile	WRB	SiBCS	Coordinates	Altitude (m)	General description
P7	Haplic Phaeozem (Pantoloamic, Raptic)	NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico	7°20'51.35"S 36°17'59.58"W	474	<i>Pouteria gardneriana</i> and <i>Senna martiana</i> dominate. Occurrence of the umbric horizon, the cambic horizon (WRB) the moderate A horizon, humic A horizon and incipient B horizon (SiBCS). Profile on the toeslope of a rocky slope. Well-drained soil, without apparent erosion and derived from autochthonous granitoid colluvium. Covered by litter. <i>Bauhinia cheilantha</i> , <i>Croton blanchetianus</i> , <i>Hymenaea courbaril</i> , <i>Hymenaea rubriflora</i> and <i>Tocoyena formosa</i> dominate. Occurrence of the mollic horizon (WRB), and the moderate A horizon (SiBCS).
P8	Eutric Regosol (Epiarenic, Katoloamic, Humic, Panpaic)	NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico léptico êutrico	7°22'10.45"S 36°16'47.21"W	498	Profile in a gnamma on the footslope of a rocky slope. The soil is well-drained, without apparent erosion, and derived from autochthonous granitoid colluvium. The soil is covered by litter. <i>Croton urticifolius</i> , <i>Guettarda angelica</i> , <i>Hymenaea rubriflora</i> and <i>Vitex orinocensis</i> predominate. Occurrence of the moderate A horizon and humic A horizon.
P9	Someric Umbrisol (Epiloamic, Katoarenic, Eutric, Humic, Raptic)	NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico fragmentário	7°22'11.64"S 36°16'49.55"W	482	Profile on the toeslope of a rocky slope. The soil is well-drained, without apparent erosion, and derived from autochthonous granitoid colluvium. The soil is covered by litter. <i>Croton urticifolius</i> , <i>Guettarda angelica</i> , <i>Hymenaea rubriflora</i> , and <i>Vitex orinocensis</i> predominate. Occurrence of the umbric horizon (WRB) and the moderate A horizon (SiBCS).
P10	Dystic Regosol (Pantoloamic, Ochric)	NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico saprolítico	7°22'19.96"S 36°16'50.30"W	483	Profile on the toeslope of a rocky slope. Well-drained soil, without apparent erosion and derived from autochthonous granitoid colluvium. The soil is covered by litter. <i>Anadenanthera colubrina</i> , <i>Bromelia laciniosa</i> , <i>Croton blanchetianus</i> , <i>Libidibia leiostachya</i> , and <i>Erythroxylum suberosum</i> predominate. Occurrence of the moderate A horizon (SiBCS).
P11	Eutric Regosol (Pantoloamic, Ochric)	NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico leptofragmentário	7°22'25.18"S 36°16'49.19"W	510	Profile on the toeslope of a rocky slope. Well-drained soil, without apparent erosion and derived from autochthonous granitoid colluvium. The soil is covered by litter. <i>Anadenanthera colubrina</i> , <i>Bromelia laciniosa</i> , <i>Croton blanchetianus</i> , <i>Libidibia leiostachya</i> , and <i>Erythroxylum suberosum</i> predominate. Occurrence of the moderate A horizon (SiBCS).
P12	Dystic Cambisol (Pantoloamic, Raptic)	CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico típico	7°21'55.33"S 36°16'43.79"W	478	Profile on the toeslope of a rocky slope. Locally it has a concave shape. Poorly drained soil, without apparent erosion and derived from autochthonous granitoid colluvium. The soil is covered by litter. <i>Cordia rigida</i> , <i>Erythroxylum suberosum</i> , and <i>Hymenaea rubriflora</i> dominate.

Continue

Continuation

Soil profile	WRB	SiBCS	Coordinates	Altitude (m)	General description
					Occurrence of the cambic horizon (WRB), the humic A horizon and incipient B horizon (SiBCS).
P13	Eutric Regosol (Loamic, Amphiarenic, Humic)	NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico	7°21'55.40"S 36°16'49.15"W	479	Profile on the toeslope of a rocky slope. Well-drained soil, without apparent erosion and derived from autochthonous granitoid colluvium. The soil is covered by litter. <i>Cordia rigida</i> , <i>Erythroxylum suberosum</i> , and <i>Hymenaea rubriflora</i> dominate. Occurrence of the humic A horizon (SiBCS).
P14	Haplic Phaeozem (Pantoloamic, Humic, Raptic)	NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico fragmentário	7°21'54.54"S 36°16'48.76"W	476	Profile on the toeslope of a rocky slope. Poorly drained soil, without apparent erosion and derived from autochthonous granitoid colluvium. The soil is covered by litter. <i>Croton blanchetianus</i> , <i>Rhamnidium molle</i> , <i>Sida galheirensis</i> , <i>Tacinga palmadora</i> , and <i>Tocoyena formosa</i> dominate. Occurrence of the mollic horizon (WRB) and the moderate A horizon (SiBCS).
P15	Eutric Regosol (Epiarenic, Amphiloamic)	NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico	7°22'43.61"S 36°16'16.39"W	525	Profile on the summit of a rocky slope. Well-drained soil, without apparent erosion and derived from autochthonous granitoid. The soil is slightly covered by leaf litter. <i>Bromelia laciniosa</i> , <i>Melocactus zehntneri</i> and <i>Xiquexique gounellei</i> dominate. Occurrence of the moderate A horizon (SiBCS).
P16	Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Raptic, Endogleyic)	GLEISSOLO MELÁNICO Tb Distrófico plintossólico	7°21'27.19"S 36°15'1.10"W	522	Profile in a fracture on the toeslope of a rocky slope. Locally it has a concave shape. Very poorly drained soil, without apparent erosion, and derived from autochthonous granitoid colluvium. Covered by leaf litter. <i>Erythrina velutina</i> , and <i>Hymenaea rubriflora</i> dominate. Occurrence of the umbric horizon (WRB), the moderate A horizon, and the glei horizon (SiBCS).
P17	Haplic Phaeozem (Epiloamic, Panpaic)	NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico saprolítico	7°21'43.53"S 36°14'59.41"W	518	Profile in a fracture on the summit of a rocky slope. Well-drained soil, without apparent erosion and derived from autochthonous granitoid colluvium. The soil is covered by litter. <i>Anadenanthera colubrina</i> and <i>Schinopsis brasiliensis</i> predominate. Occurrence of the mollic horizon (WRB) and the moderate A horizon (SiBCS).
P18	Haplic Phaeozem (Pantoloamic, Panpaic)	NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico organossólico	7°21'49.61"S 36°14'58.86"W	509	Profile in a fracture on the toeslope of a rocky slope. Well-drained soil, without apparent erosion and derived from autochthonous granitoid alluvial-colluvial material. The soil is covered by litter. <i>Handroanthus impetiginosus</i> and <i>Plinia grandifolia</i> dominate. Occurrence of the mollic horizon (WRB) and the prominent A horizon (SiBCS).

Continue

Continuation

Soil profile	WRB	SiBCS	Coordinates	Altitude (m)	General description
P19	Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Eutric)	NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico	7°21'32.08"S 36°15'11.12"W	498	Profile in a fracture on the toeslope of a rocky slope. Well-drained soil, without apparent erosion and derived from autochthonous granitoid colluvium. The soil is covered by litter. <i>Anadenanthera colubrina</i> and <i>Syagrus cearensis</i> dominate. Occurrence of the umbric horizon (WRB) and the moderate A horizon (SiBCS).
P20	Salic Vertisol (Hypereutric, Epic, Gleyic)	VERTISSOLO HIDROMÓRFICO Órtico típico	7°22'17.58"S 36°15'53.28"W	483	Profile on a periodically flooded lagoon at the base of a rocky slope. Poorly drained soil, without apparent erosion and derived from alluvial-colluvial material from the granitoid. Absence of litter. <i>Prosopis juliflora</i> and <i>Tabebuia aurea</i> on the banks of the lagoon. Occurrence of the vertic horizon, the salic horizon (WRB), the moderate A and B vertic horizons (SiBCS).
P21	Eutric Leptosol (Loamic)	NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico	7°22'18.84"S 36°16'51.56"W	484	Profile on a dissected pediment surface. Well-drained soil, with apparent laminar erosion and derivatives of native granitoids. Litter is absent due to the scarce vegetation cover. <i>Sida galheirensis</i> and <i>Xiquexique gounellei</i> dominate.
<i>Typical Caatinga soils</i>					
P22	Eutric Yermic Regosol (Pantoloamic, Saprilitic)	NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico	7°23'32.90"S 36°20'37.60"W	490	Profile on a dissected pediment surface. Well-drained soil, with apparent laminar erosion and derived from autochthonous gneiss. Absence of litter due to scarce vegetation cover, with only the scattered occurrence of species such as <i>Aspidosperma pyrifolium</i> , <i>Jatropha ribifolia</i> and <i>Sida galheirensis</i> . Occurrence of the moderate A horizon (SiBCS).
P23	Yermic Vertic Luvisol (Epiloamic, Clayic, Hypereutric, Epic)	LUVISSOLO CRÓMICO Órtico vertissólico	7°22'16.45"S 36°14'56.34"W	464	Profile on a dissected pediment surface. Poorly drained soil, with apparent laminar erosion and derived from autochthonous gneiss. Absence of litter due to scarce vegetation cover, with only the scattered occurrence of species such as <i>Cenostigma nordestinum</i> and <i>Xiquexique gounellei</i> . Occurrence of the argic horizon (WRB), and the textural B horizon (SiBCS).
P24	Yermic Fluvic Cambisol (Polyarenic, Polyloamic)	CAMBISSOLO FLUVICO Ta eutrófico típico	7°23'6.40"S 36°19'41.80"W	433	Profile on a river terrace. Well-drained soil, with extremely strong erosion (laminar and gullies), derived from alluvial material. Absence of litter and dominance of species such as <i>Prosopis juliflora</i> and <i>Sida galheirensis</i> . Occurrence of the cambic horizon (WRB), the moderate A horizon, and the incipient B horizon (SiBCS).

Continue

Soil profile	WRB	SiBCS	Coordinates	Altitude (m)	General description	Conclusion
P25	Yermic Leptic Luvisol (Epicleptic, Epiloamic, Epic)	LUVISSOLO HAPLICO Órtico léptico	7°23'47.44"S 36°27'6.55"W	439	Profile on an eroded pediment surface. Well-drained soil with laminar erosion and derived from autochthonous gneiss. The ground is covered with litter and specimens of dry forests. Domain of <i>Anadenanthera colubrine</i> and <i>Cenostigma piramydale</i> . Occurrence of the argic horizon (WRB), the weak A horizon, and textural B horizon (SiBCS).	
P26	Yermic Vertic Luvisol (Pantoloamic, Epic)	LUVISSOLO CRÓMICO Órtico vertissólico	7°26'24.32"S 36°14'57.70"W	456	Profile on an eroded pediment surface. Well-drained soil with laminar erosion and derived from autochthonous gneiss. The ground is covered with litter and specimens of dry forests. Domain of <i>Anadenanthera colubrine</i> , <i>Cenostigma piramydale</i> , and <i>Mimosa ophthalmocentra</i> . Occurrence of the argic horizon (WRB), weak A horizon, and textural B horizon (SiBCS).	
P27	Yermic Luvisol (Pantoloamic, Epic)	LUVISSOLO CRÓMICO Órtico típico	7°19'19.81"S 36°25'30.22"W	487	Profile on an eroded pediment surface. Well-drained soil with laminar erosion and derived from autochthonous gneiss. The ground is covered with litter and specimens of dry forests. Domain of <i>Anadenanthera colubrine</i> and <i>Cenostigma piramydale</i> . Occurrence of the argic horizon (WRB), the weak A horizon, and textural B horizon (SiBCS).	
P28	Eutric Regosol (Epiloamic, Amphiarenic)	NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico léptico	7°14'19.72"S 36°32'39.59"W	511	Profile on an eroded pediment surface. Well-drained soil with laminar erosion and derived from autochthonous gneiss. The ground is covered with litter and specimens of dry forests. Domain of <i>Anadenanthera colubrine</i> , <i>Cenostigma piramydale</i> , and <i>Mimosa ophthalmocentra</i> .	
P29	Yermic Luvisol (Pantoloamic, Epic)	LUVISSOLO CRÓMICO Órtico típico	7°14'24.40"S 36°32'40.81"W	512	Profile on an eroded pediment surface. Well-drained soil with strong erosion and derived from autochthonous gneiss. Litter and vegetation cover are absent. Occurrence of the argic horizon (WRB), the weak A horizon, and textural B horizon (SiBCS).	
P30	Yermic Luvisol (Pantoclayic, Epic)	LUVISSOLO CRÓMICO Órtico típico	7°22'12.11"S 36°23'9.71"W	446	Profile on an eroded pediment surface. Well-drained soil with strong erosion and derived from autochthonous gneiss. Litter and vegetation cover are absent. Occurrence of the argic horizon (WRB), the weak A horizon, and textural B horizon (SiBCS).	
P31	Yermic Luvisol (Pantoclayic, Epic)	LUVISSOLO CRÓMICO Órtico típico	7°24'46.40"S 36°23'28.61"W	446	Profile on the dissected pediment surface of a slope. Well-drained soil with strong erosion and derived from autochthonous gneiss. Litter is absent. <i>Aspidosperma pyrifolium</i> , <i>Jatropha mollissima</i> and <i>Sida galheiensis</i> dominate. Occurrence of the argic horizon (WRB), the weak A horizon, and textural B horizon (SiBCS).	

SOURCE: Elaboration by author (2024).

5.1.4.1 Soils in GIF

Among the 21 soil profiles formed in the GIF, seven were classified as Regosols, six as Umbrisol, four as Phaeozem, two as Cambisols, and one as Letpsol and Vertisol (Table 2). The depths of the profiles varied between less than 20 and 310 cm, with an average of 94 cm (Table 3). Transitions between horizons are predominantly smooth and clear. The most recurrent horizon sequence is A over C. The colors of the horizons varied from black to olive. Gleyic properties were observed in the deepest horizons in one Cambisol and Vertisol developed in concave-shaped locations at the toeslope of inselbergs. Oximorphic features were recorded from 94 cm deep in one Cambisol, suggesting oscillation of the water table. Mollic and umbric horizons were identified on the surface of the soil profiles. The cambic horizon was registered in two soil profiles in toeslopes (P6 and P12). The vertic horizon was exclusively associated with a valley formed by dissolution of mafic xenoliths.

TABLE 3 - MORPHOLOGICAL SOIL PROPERTIES.

Horizon	Depth (cm)	Boundary (distinctness, topography)	Moist color	Structure (grade, size, type)	Consistence (dry, moist, wetter)	Roots (quantity, size)	Pores (quantity, shape)
<i>GIF soils</i>							
P1 - Someric Umbrisol (Pantoloamic, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico típico							
Ah1	0-10	C-S	5Y 1/1	2, f-m, gr	-, Fl, so, po	3, vf-f-m-co	3, m-co, TU-DT
2Ah2	10-32	C-S	5Y 1/1	1, f-m, gr-sbk	-, Fl, so, po	3, vf-f-m	2, m-co, TU
2AC	32-50	C-S	5Y 1/1	1, f-m-co, sbk	-, Fl, so, ps	3, vf-f	1, vf-f-m, TU
3Ahb	50-65	C-S	5Y 2/1	2, f-m, sbk	-, Fl, so, ps	3, vf-f-m	2, vf-f, TU
3Ce1	65-90	C-S	5Y 3/2	1, f-m, sbk	-, Fl, so, po	3, vf-f	2, f-m, IG
3Ce2	90-115+		5Y 2.5/2	1, m-co, sbk	-, Fl, so, ps	1, vf-f	2, f-m, IG
P2 - Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Hyperdystic, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico							
Ah1	0-5	A-S	5Y 1/1	1, f-m, gr	-, Fl, so, po	3, vf-f-m	2, f-m, TU-DT
2Ah2	5-25	C-S	5Y 2/1	1, m, gr	-, Fl, so, po	3, vf-f-m-vc	1, m, TU
2Ah3	25-55	C-S	5Y 2.5/2	2, f-m, sbk	-, Fl, so, po	3, vf-f-m	2, f-m, TU
2AC	55-75	C-S	5Y 3/2	2, f-m-co, sbk	-, Fl, so, ps	3, vf-f	3, vf-f, TU
2C	75-95+		2.5Y 4/4	2, f-m, sbk	-, Fl, so, ps	2, vf-f	2, f-m, IG-TU
P3 - Dystric Regosol (Pantoloamic, Humic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico							
A1	0-2	A-S	2.5Y 2.5/1	1, f-m, sbk	SH, Fl, so, po	1, vf	1, vf-f, IG-TU
A2	2-10	C-S	2.5Y 3/1	1, f-m, sbk	S, Fl, so, po	1, m; 3, vf-f	2, f-m, TU
CA	10-25	C-S	2.5Y 4/3	2, f-m, sbk	S, Fl, so, po	2, vf-f	3, vf-f, IG-TU
CR	25-55+		2.5Y 3/3	2, f-m, sbk	S, Fl, ss, ps	2, vf-f	2, vf-f, IG-TU
P4 - Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Hyperdystic, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico							
Ah1	0-8	C-S	5Y 1/1	1, f, gr	S, Fl, so, po	2, vf	3, vf, TU

Continue

Continuation

Horizon	Depth (cm)	Boundary (distinctness, topography)	Moist color	Structure (grade, size, type)	Consistence (dry, moist, wetter)	Roots (quantity, size)	Pores (quantity, size, shape)
2Ah2	8-22	C-S	5Y 2/1	1, f, sbk	S, Fl, so, po	2, vf-f-m-co	3, vf-f, TU
2Ah3	22-70	C-S	5Y 2.5/1	2, m-, sbk	-, Fl, so, po	3, vf-f-m-co	3, f-m, TU
2AC	70-104	C-S	5Y 2.5/2	1, f-m, sbk	-, Fl, so, po	2, vf-f	2, vf-f, IG-TU
3Ahb	104-125	A-S	5Y 3/2	1, f-vf, sbk	-, Fl, so, po	1, vf	2, f-m, IG
R	125+						
P5 - Dystric Regosol (Pantoloamic, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico							
A	0-4	A-S	2.5Y 3/1	2, f-m, sbk	S, Fl, so, po	2, vf-f	1, f-m, TU
2Ab	4-18	C-S	2.5Y 3/3	1, f, sbk	S, Fl, so, po	2, vf-f	1, f-m, TU
Ce	18-55+		5Y 4/4	0, -, sg	L, Fl, so, po	1, vf-f	3, f-m-co, IR
P6 - Cambic Someric Umbrisol (Pantoloamic, Humic, Panpaic)/CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico típico							
Ah	0-8	C-S	5Y 2.5/1	1-2, f, gr-sbk	S, Fl, so, po	2, vf-f	2, vf-f-m, TU
2Ahb1	8-20	C-S	5Y 2.5/2	2, f-m, gr	SH, Fl, so, po	2, vf-f-m	2, vf-f, TU
3Ahb2	20-45	C-S	5Y 2.5/1	2, f-m-co, sbk	-, Fl, ss, ps	3, vf-f-m; 1, co	3, vf-f-m-co, TU
4Ahb3	45-90	C-S	5Y 2.5/2	2, m-co, sbk	-, Fl, so, ps	3, vf-f-m-co; 1, vc	3, vf-f-m, TU
5Bw	90-125	C-S	2.5Y 3/3	2, m-co, sbk	-, Fl, so, ps	1, vf-f	2, vf-f, IG-TU
Ce	125-145+		2.5Y 3/3	1-2, m-co, sbk	-, Fl, so, ps	1, vf-f	3, vf-f, IG
P7 - Haplic Phaeozem (Pantoloamic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico							
Ah1	0-10	C-S	2.5Y 2.5/1	1, f-co, gr-sbk	S, Fl, so, po	3, vf-f	3, f-m, TU
2Ah2	10-25	C-S	2.5Y 4/1	2, f-m-co, sbk	SH, Fl, so, po	2, f-m; 1, vf	3, f-m-co, TU
2CA	25-95	C-S	2.5Y 4/2	2, f-m-co, sbk	HA, F, ss, ps	2, f-m; 1, vf	2, vf-f-m, IG-TU

Continue

Continuation

Horizon	Depth (cm)	Boundary (distinctness, topography)	Moist color	Structure (grade, size, type)	Consistence (dry, moist, wetter)	Roots (quantity, size)	Pores (quantity, size, shape)
2C	95-105+		2.5Y 5/3	2, f-m, sbk	HA, F, ss, ps	1, vf-f	1, vf-f, IG
P8 - Eutric Regosol (Epiarenic, Katoloamic, Humic, Panpaic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico léptico éutrico							
Ah	0-5	A-S	10YR 2/1	0, -, sg	L, L, so, po	1, f	3, m, -
2Ahb1	5-25	C-S	2.5Y 2.5/1	0, -, sg	L, L, so, po	1, f	1, m, -
3Ahb2	25-50	C-S	10YR 2/1	1, f-m, sbk	L, Fl, so, po	3, m	3, m, -
CR	50-90	A-S	10YR 2/1	1, f-m, sbk	L, L, so, po	2, co	2, m, -
R	90+						
P9 - Someric Umbrisol (Epiloamic, Katoarenic, Eutric, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico fragmentário							
Ah1	0-5	A-S	5YR 2/2	2, m, gr	L-S, VRF, so, po	3, f	1-2, f, -
2Ah2	05-35	C-S	2.5Y 2/2	1, f, sbk	L, F, so, po	2, m-co	3, m, -
2C	35-60	A-S	5Y 5/1	0, -, sg	L, L, so, po	1, m	1, f, -
R	60+						
P10 - Dystric Regosol (Pantoloamic, Ochric)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico saprolítico							
Ah	0-8	C-S	2.5Y 4/2	0, -, sg	L, L, so, po	2, f-m	3, m-co, -
AC	8-30	C-S	7.5YR 3/2	2, f-m, sbk	S, Fl, so, po	2, m-co	3, m, -
C	30-50	C-S	2.5Y 4/2	2, f-m, sbk	S, Fl, ss, ps	1, f	1, m, -
Ce	50-100	A-S	2.5Y 4/4	1, f-m, sbk	L, Fl, ss, ps	absent	1, f, -
R	100+						
P11 - Eutric Regosol (Pantoloamic, Ochric)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico leptofragmentário							
Ah	0-8	C-S	2.5Y 3/2	1, m, gr	L, Fl, so, po	1, f	3, m, -
AC	8-35	C-S	2.5Y 3/2	2-3, m, sbk	SH, Fl, ss, ps	2, f-m	1, m, -

Continue

Horizon	Depth (cm)	Boundary (distinctness, topography)	Moist color	Structure (grade, size, type)	Consistence (dry, moist, wetter)	Roots (quantity, size)	Pores (quantity, size, shape)
CR	35-60	A-S	10YR 3/3	0, -, m	L, Fl, ss, ps	absent	1, f, -
R	60+						
P12 - Dystric Cambisol (Pantoloamic, Raptic)/CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico típico							
Ah1	0-5	A-S	5Y 2.5/1	1, m, gr	HA, Fl, so, ps	3, f-m	3, f, -
Ah2	5-40	C-S	5Y 2.5/2	1, f-m, gr	HA, Fl, ss, ps	3, f-m-co-vc	3, m, -
Bw1	40-65	C-S	5Y 2.5/2	2, m, sbk	SH, VRF, s, p	2, f-m	1, m, -
2Bw2	65-82	C-S	5Y 3/2	2, m, sbk	SH, Fl, so, p	3, f-m-co	3, m, -
2BC	82-92	C-S	2.5Y 4/4	1, f, sbk	S, Fl, so, ps	3, f-m	1, m, -
2C	92-105	C-S	2.5Y 4/4	1, f, sbk	S, Fl, so, ps	1, f	1, f, -
2CR	105-150+		2.5Y 5/4	1, f, sbk	S, Fl, so, po	1, co	1, f, -
P13 - Eutric Regosol (Loamic, Amphiarenic, Humic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico							
Ah	0-15	C-S	10YR 2/1	1, f, gr	L, L, so, po	3, f-m	3, m, -
AC	15-40	C-S	2.5Y 3/2	0, -, sg	L, L, so, po	3, co-vc	3, vc, -
CR	40-90+		2.5Y 5/6	1, f, sbk	SH, Fl, so, po	absent	1, m, -
P14 - Haplic Phaeozem (Pantoloamic, Humic, Raptic)/NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico fragmentário							
Ah1	0-8	C-S	10YR 2/1	2, m-co, gr	SH, L, so, po	3, f	3, m, -
2Ah2	8-20	C-S	2.5Y 3/2	1, m, sbk	SH, Fl, so, ps	3, f-m	3, m, -
2C	20-30	C-S	10YR 3/3	0, -, m	L, Fl, ss, ps	2, m-co	2, f, -
2CR	30-40	A-S	10YR 3/4	0, -, m	L, Fl, so, po	absent	1, f, -
R	40+						
P15 - Eutric Regosol (Epiarenic, Amphiloamic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico							

Continue

Continuation

Horizon	Depth (cm)	Boundary (distinctness, topography)	Moist color	Structure (grade, size, type)	Consistence (dry, moist, wetter)	Roots (quantity, size)	Pores (quantity, size, shape)
A	0-5	A-S	10YR 2/2	2, m-co, gr-sbk	-, Fl, so, po	3, f-m	2, vf-f, -
AC1	5-15	C-S	7.5YR 3/3	2, m, sbk	S, Fl, so, po	2, vf-f	1, f, -
AC2	15-30	C-S	7.5YR 3/2	2, f-m, sbk	SH, Fl, so, po	1, co; 2, vf-f	2, vf-f, -
C	30-60	A-S	5YR 3/4	1, f, sbk	S, L, so, po	1, vf-f	1, vf, -
R	60+						
P16 - Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Raptic, Endogleyic)/GLEISSOLO MELÁNICO Tb Distrófico plintossólico							
Ah1	0-5	A-S	10YR 2/1	2, f, gr	SH, Fl, so, ps	3, vf-f	3, m-co, DT
2Ah2	5-25	G-S	2.5YR 2.5/1	2, f, sbk	-, Fl, ss, ps	2, m-co	2, m, TU
2A3	25-60	G-S	10YR 4/4	2, m, sbk	-, Fl, ss, ps	2, m	2, m, TU
2AC	60-94	C-S	2.5YR 3/1	2, m, sbk	-, Fl, s, p	2, m	2, f, VE
2Cg1	94-130	C-S	GLE Y 1 6/10Y	0, -, m	-, Fl, ss, ps	2, f-m	1, f, VE
2Cg2	130-310+						
P17 - Haplic Phaeozem (Epiloamic, Panpaic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico saprolítico							
Ah	0-3	A-S	2.5Y 3/1	1, f-m-co, sbk	S, Fl, so, po	2, vf-f	3, f-m, DT-TU
2Ahb	3-20	C-S	10YR 4/2	1, f, sbk	S, Fl, so, po	2, vf-f-m	2, f-m, IG-TU
C1	20-30	C-S	10YR 3/3	1, f, sbk	SH, Fl, so, po	3, f-m	3, vf-f-m, IG-TU
C2	30-40	C-S	10YR 5/3	1, f, sbk	SH, Fl, ss, ps	1, vf-f	3, vf-f, IG-TU
Ce	40-45+		10YR 2/2	2, f-m, sbk	HA, F, ss, ps	1, vf	1, vf-f, IG
P18 - Haplic Phaeozem (Pantoloamic, Panpaic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico							
Ah1	0-10	C-S	5Y 2.5/1	1, f-m, gr	S, L, so, po	3, vf-f	3, f-m, TU
Ah2	10-20	C-S	2.5Y 3/2	2, m-co, sbk	SH, Fl, so, po	2, f-m-co	3, f-m, TU

Continue

Continuation

Horizon	Depth (cm)	Boundary (distinctness, topography)	Moist color	Structure (grade, size, type)	Consistence (dry, moist, wetter)	Roots (quantity, size)	Pores (quantity, size, shape)
2Ahb	20-35	C-S	2.5Y 3/2	1, f-m, sbk	S, Fl, so, po	3, co-vc	2, f-m, TU
2AC	35-65	C-S	2.5Y 4/3	2, f-m, sbk	SH, Fl, so, po	2, vf-f-m-co	3, vf-f, IG-TU
2Ce	65-80+		2.5Y 6/2	1-2, f-m, sbk	SH, Fl, so, po	1, f-m	2, vf-f, IG-TU
P19 - Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Eutric)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico							
Ah	0-3	C-S	5Y 2.5/1	2, f-m-co, gr	S, Fl, so, po	1, vf-f	3, co, TU
A	3-25	C-S	10YR 2/2	1, f-m, sbk	S, Fl, so, po	3, f-m-co	3, f-m, TU
C	25-45	C-S	7.5YR 3/3	1, f-m, sbk	S, L, so, po	3, vf-f-m-co	2, f-m, TU
Ce	45-70+		7.5YR 3/4	1, f, sbk	SH, Fl, so, po	2, f-m	1, vf-f-m, IG-TU
P20 - Salic Vertisol (Hypereutric, Epic, Gleyic)/VERTISSOLO HIDROMÓRFICO Órtico típico							
A	0-45	C-S	GLE Y 1 2.5/N	3, co-vc-ec, pr	HA, Fl-VRF, vs, vp	2, vf-f-m	3, m-co-vc TU
2Bvn	45-110+		GLE Y 2 2.5/1 10B	3, co-vc, sbk	HA, VRF, vs, vp	1, f	3, f-m, IG-TU
P21 - Eutric Leptosol (Loamic)/NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico							
Ap	0-20	A-S	2.5Y 4/2	0, -, sg	L, F, so, po	absent	1, f, -
R	20+						
Typical Caatinga soils							
P22 - Eutric Yermic Regosol (Pantoloamic, Saprolithic)/NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico							
Ap	0-15	C-S	2.5Y 3/2	1-2, f, sbk	S, Fl, so, po	2, vf-f-m	3, f-m, DT
C	15-35	A-S	2.5Y 4/4	2, f, sbk	SH, Fl, ss, ps	2, vf-f; 1, co	2, vf-f, IG-TU
R	35+						
P23 - Yermic Vertic Luvisol (Epiloamic, Clayic, Hypereutric, Epic)/LUVISSOLO CRÔMICO Órtico vertissólico							

Continue

Continuation

Horizon	Depth (cm)	Boundary (distinctness, topography)	Moist color	Structure (grade, size, type)	Consistence (dry, moist, wetter)	Roots (quantity, size)	Pores (quantity, size, shape)
A	0-10	C-S	2.5Y 2.5/4	3, f, gr	-, Fl, ss, p	absent	2, m, -
B	10-40	C-S	2.5Y 2.5/4	3, co, sbk	HA, Fl, vs, vp	1, m	1, f, -
Bt	40-45	A-S	2.5Y 4/4	3, m, pr	HA, VF, vs, vp	absent	1, f, -
R	45+						
P24 - Yermic Fluvic Cambisol (Polyarenic, Polyloamic)/CAMBISSOLO FLÚVICO Ta eutrófico típico							
A	0-18	C-S	2.5Y 4/2	1, f, gr	S, Fl, so, po	2, vf-f	1, f-m, -
2Bw1	18-32	C-S	2.5Y 3/2	2, f, sbk	SH, Fl, ss, ps	1, vf-f-m	1, f, -
3Bw2	32-75	C-S	2.5Y 3/2	2, f, sbk	S, Fl, so, po	1, vf-f-m	2, f-m, -
4C	75-104	A-S	5Y 4/3	0, -, sg	L, Fl, so, po	1, f-m	1, f-m, -
5Bw3	104-115	C-S	2.5Y 4/2	2, f, sbk	SH, Fl, so, po	absent	2, f, -
6C	115-140	A-S	2.5Y 3/2	1, f, sbk	SH, Fl, so, po	1, vf-f	1, f-m, -
7Bw4	140-180	C-S	2.5Y 3/3	2, vf-f, sbk	SH, Fl, ss, po	1, vf-f	1, f, -
7Bw5	180-190	C-S	10YR 3/2	2, f-m, sbk	S, Fl, so, po	absent	1, vf, -
7Bw6	190-230+		2.5Y 4/3	1, m, sbk	S, Fl, so, po	absent	1, f-m, -
P25 - Yermic Leptic Luvisol (Epidayic, Epiloamic, Epic/ LUVISSOLO HÁPLICO Órtico típico							
BA	0-10	C-S	10R 3/3	2, vf-f, sbk	SH, Fl, s, vp	2, vf	3, m-co, -
Bt	10-30	C-S	2.5YR 3/2	3, m-co-vc, abk	HA, F, vs, vp	1, vf-f-m	3, vf-f-m, -
BC	30-50	A-S	7.5YR 4/4	0, -, m	HA, F, s, p	absent	2, vf, -
R	50+						
P26 - Yermic Vertic Luvisol (Pantoloamic, Epic/LUVISSOLO CRÔMICO Órtico vertissólico							
A	0-5	C-S	2.5YR 3/3	2, f-m, sbk	SH, Fl, ss, ps	absent	1, m; 2, vf-f, -

Continue

Continuation

Horizon	Depth (cm)	Boundary (distinctness, topography)	Moist color	Structure (grade, size, type)	Consistence (dry, moist, wetter)	Roots (quantity, size)	Pores (quantity, size, shape)
AB	5-20	C-S	2.5YR 3/3	2, f-m, sbk	SH, Fl, ss, ps	1, vf-f-m	2, vf-f; 1, m-co, -
Bt	20-40	A-S	5YR 3/2	3, co-vc, pr	EF, VF, vs, vp	1, vf-f-m	1, f-m, TU
R	40+						
P27 - Yermic Luvisol (Pantoloamic, Epic)/LUVISSOLO CRÓMICO Órtico típico							
A	0-10	C-S	7.5YR 3/3	2, f-m, sbk	HA, Fl, so, ps	1, f-m	3, vf-f, TU
Bt	10-30	C-S	7.5YR 4/3	2, f-m, sbk	HA, Fl, ss, ps	2, vf-f; 1, co	2, f-m-co, TU
C	30-50	A-S	7.5YR 4/6	2, m, sbk	HA, Fl, ss, ps	1, vf-f	3, f-m, TU
R	50+						
P28 - Eutric Regosol (Epiloamic, Amphiarenic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico léptico							
Ap	0-16	C-S	10YR 3/2	2, f, sbk	S, Fl, so, po	3, vf-f	2, vf-f-m, -
A	16-54	C-S	10YR 3/3	2, f-m, sbk	S, Fl, so, po	2, vf-f	2, vf-f-m, -
CA	54-70	C-S	2.5Y 4/3	2, f-m, sbk	S, Fl, so, po	2, vf	1, vf-f, -
C	70-80	A-S	10YR 4/4	1, f-m, sbk	S, Fl, so, po	1, vf	1, vf-f, -
R	80+						
P29 - Yermic Luvisol (Pantoloamic, Epic)/LUVISSOLO CRÓMICO Órtico típico							
Ap	0-13	C-S	10R 3/2	2, f-m, sbk	SH, Fl, ss, ps	2, vf-f	2, vf-f, -
AB	13-32	C-S	2.5YR 2.5/3	2, f-m, sbk	SH, Fl, ss, ps	1, vf-f-m	2, f-m, -
Bt1	32-45	C-S	2.5YR 3/2	2, f-m, sbk	SH, Fl, ss, ps	1, vf-f-m	2, f-m, -
Bt2	45-75	A-S	2.5YR 2.5/2	3, ec, abk	HA, F, vs, p	1, vf	1, vf-f, -
R	75+						
P30 - Yermic Luvisol (Pantoclayic, Epic)/LUVISSOLO CRÓMICO Órtico típico							

Continue

Horizon	Depth (cm)	Boundary (distinctness, topography)	Moist color	Structure (grade, size, type)	Consistence (dry, moist, wetter)	Roots (quantity, size)	Pores (quantity, size, shape)	Conclusion
A	0-15	C-S	5YR 3/2	2, f, sbk	SH, FI, s, vp	2, vf-f	2, f-m, TU	
Bt	15-35	C-S	10YR 2/1	3, f-m, pr-sbk	HA, F, vs, vp	1, vf-f-m	2, m, IG	
C	35-52+		5YR 3/1	0, -, m	EF, VRF, vs, p	1, vf	2, f-m, IG	
P31 - Yermic Luvisol (Pantoclayic, Epic)/LUVISSOLO CRÓMICO Órtico típico								
A	0-15	C-S	2.5YR 2/2	2, m, sbk	HA, FI, ss, ps	1, vf-f	2, vf-f, TU	
Bt	15-45	A-S	10R 2/2	3, co, pr	HA, VF, vs, vp	2, vf-f	2, f-md, TU	
R	45+							

Boundary: Distinctness: A = abrupt, C = clear, G = gradual. Topography: S=smooth. Structure: Grade: 0 = structureless, 1 = weak, 2 = moderate, 3 = strong. Size: co = coarse, f = fine, m = medium, vc = very coarse. Type: abk = angular block, gr = granular, m = massive, pr = prismatic, sbk = subangular block. Consistence: Dry: EH = extremely hard, HA = dura, L = loose, S = soft, SH = slightly hard. Moist: EF= extremely firm, F = firm, FI = friable, VF = very firm. Wet: p = plastic, po = non plastic, ps = slightly plastic, s = sticky, ss = slightly sticky, so= non sticky, vs= very sticky, vp = very plastic. Roots and pores: 1 = few, 2 = common, 3 = abundant, co = coarse, f = fine, m = medium, vc = very coarse, vf = very fine, DT = dendritic tubular, IG = Irregular, IR = interstitial, TU = tubular, VE = vesicular. **SOURCE:** Elaboration by author (2024).

Very fine and fine roots range from common to abundant at all depths. Thicker roots occur between 5 and 90 cm deep. Abundant pores ranging from small to large are preferentially in the superficial horizons, while few pores are observed in the deeper horizons. The dominance of tubular pores and, to a lesser extent, dendritic pores suggest widespread bioturbation.

The predominant structure is weak to moderate, small to medium in size, of the subangular blocky type. Dry consistency varies from loose to slightly hard. The consistency is predominantly friable, non-sticky, and non-plastic. Exceptions are observed in soils with clay contents higher than 25% in profiles developed in the lower portions of the slopes (Table 4). The soils are gravelly and have a sandy clay loam to sandy loam texture. Coarse sand content predominates, accounting for 51% of the soil composition. Variations in grain size ratios suggest lithic discontinuity between horizons, indicating that the materials that form these soils are autochthonous and allochthonous (Table 4). The lithic discontinuities were registered between 5 cm and 310 cm depth, indicating frequent contributions. Buried horizons were identified in soils on toeslope (P1, P6, P17, and P18), gnammas (P4 and P8), and shoulder (P5).

TABLE 4 - PHYSICAL PROPERTIES. CS: COARSE SAND E FS: FINE SAND.

Horizon	Depth (cm)	CS ----- %	FS ----- %	Silt ----- %	Clay ----- %	Texture	CS/FS	FS/Silt	Silt/Clay
<i>GIF soil</i>									
P1 - Someric Umbrisol (Pantoloamic, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico típico									
Ah1	0-10	37.0	10.4	18.3	34.3	Sandy clay loam	3.56	2.59	0.53
2Ah2	10-32	49.3	16.0	12.4	22.3	Sandy clay loam	3.08	5.27	0.56
2AC	32-50	54.1	12.1	12.4	21.3	Sandy clay loam	4.47	5.34	0.58
3Ahb	50-65	56.4	11.7	14.3	17.5	Sandy loam	4.82	4.76	0.82
3Ce1	65-90	49.8	8.7	20.1	21.4	Sandy clay loam	5.72	2.91	0.94
3Ce2	90-115+	50.4	10.4	18.7	20.5	Sandy clay loam	4.85	3.25	0.91
P2 - Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Hyperdystric, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico									
Ah1	0-5	45.0	9.4	16.9	28.8	Sandy clay loam	4.79	3.22	0.59
2Ah2	5-25	52.3	10.6	13.0	24.1	Sandy clay loam	4.93	4.84	0.54
2Ah3	25-55	50.3	12.9	13.1	23.7	Sandy clay loam	3.90	4.82	0.55

Continue

Continuation

Horizon	Depth (cm)	CS	FS	Silt	Clay	Texture	CS/FS	FS/Silt	Silt/Clay
----- % -----									
2AC	55-75	51.1	14.6	11.8	22.4	Sandy clay loam	3.50	5.57	0.53
2C	75-95+	49.6	14.3	13.5	22.6	Sandy clay loam	3.47	4.73	0.60
P3 - Dystric Regosol (Pantoloamic, Humic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico									
A1	0-2	66.2	12.9	7.7	13.2	Sandy loam	5.13	10.27	0.58
A2	2-10	64.4	13.9	9.0	12.7	Sandy loam	4.63	8.70	0.71
CA	10-25	56.3	15.0	8.2	20.5	Sandy clay loam	3.75	8.70	0.40
CR	25-55+	48.6	14.6	11.4	25.4	Sandy clay loam	3.33	5.54	0.45
P4 - Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Hyperdystric, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico									
Ah1	0-8	64.8	7.1	7.1	21.0	Sandy clay loam	9.13	10.13	0.34
2Ah2	8-22	59.1	7.9	11.8	21.2	Sandy clay loam	7.48	5.68	0.56
2Ah3	22-70	60.6	9.2	11.0	19.2	Sandy loam	6.59	6.35	0.57
2AC	70-104	61.1	6.2	12.4	20.4	Sandy clay loam	9.85	5.43	0.61
3Ahb	104-125	57.9	8.2	14.0	19.9	Sandy loam	7.06	4.72	0.70
R									
P5 - Dystric Regosol (Pantoloamic, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico									
A	0-4	59.3	10.8	9.6	20.2	Sandy clay loam	5.49	7.30	0.48
2Ab	4-18	52.7	13.4	14.2	19.7	Sandy loam	3.93	4.65	0.72
Ce	18-55+	64.9	9.8	16.2	9.1	Sandy loam	6.62	4.61	1.78
P6 - Cambic Someric Umbrisol (Pantoloamic. Humic. Panpaic)/CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico típico									
Ah	0-8	68.0	9.0	9.2	13.8	Sandy loam	7.56	8.37	0.67
2Ahb1	8-20	69.1	9.0	8.9	13.1	Sandy loam	7.68	8.78	0.68
3Ahb2	20-45	54.9	12.3	11.9	20.9	Sandy clay loam	4.46	5.65	0.57
4Ahb3	45-90	51.1	15.5	8.9	24.5	Sandy clay loam	3.30	7.48	0.36
5Bw	90-125	35.0	17.1	19.3	28.6	Sandy clay loam	2.05	2.70	0.67
Ce	125-145+	41.5	12.6	22.4	23.5	Sandy clay loam	3.29	2.42	0.95
P7 - Haplic Phaeozem (Pantoloamic. Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico									
Ah1	0-10	34.7	31.6	14.1	19.5	Sandy loam	1.10	4.70	0.72
2Ah2	10-25	38.2	27.2	14.6	20.0	Sandy clay loam	1.40	4.48	0.73
2CA	25-95	43.7	26.8	12.5	17.0	Sandy loam	1.63	5.64	0.74
2C	95-105+	38.0	27.7	16.3	18.0	Sandy loam	1.37	4.03	0.91
P8 - Eutric Regosol (Epiarenic, Katoloamic, Humic, Panpaic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico léptico éutrico									

Continue

Continuation

Horizon	Depth (cm)	CS	FS	Silt	Clay	Texture	CS/FS	FS/Silt	Silt/Clay
----- % -----									
Ah	0-5	82.9	7.3	1.1	8.7	Sand	11.36	82.00	0.13
2Ahb1	5-25	59.5	19.9	7.3	13.2	Sandy loam	2.99	10.88	0.55
3Ahb2	25-50	43.6	27.1	11.5	17.9	Sandy loam	1.61	6.15	0.64
CR	50-90	55.7	15.5	13.0	15.9	Sandy loam	3.59	5.48	0.82
R									
P9 - Someric Umbrisol (Epiloamic, Katoareni, Eutric, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico fragmentário									
Ah1	0-5	53.8	17.1	12.1	17.0	Sandy loam	3.15	5.86	0.71
2Ah2	05-35	71.0	13.1	7.3	8.6	Loamy sand	5.42	11.52	0.85
2C	35-60	72.4	10.2	9.2	8.2	Loamy sand	7.10	8.98	1.12
R									
P10 - Dystric Regosol (Pantoloamic, Ochric)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico saprolítico									
Ah	0-8	55.3	21.2	10.6	12.9	Sandy loam	2.61	7.22	0.82
AC	8-30	52.5	21.0	10.5	16.0	Sandy loam	2.50	7.00	0.66
C	30-50	44.6	20.1	10.7	24.5	Sandy clay loam	2.22	6.05	0.44
Ce	50-100	46.9	13.3	14.8	25.0	Sandy clay loam	3.53	4.07	0.59
R									
P11 - Eutric Regosol (Pantoloamic, Ochric)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico leptofragmentário									
Ah	0-8	44.2	26.4	14.9	14.6	Sandy loam	1.67	4.74	1.02
AC	8-35	42.4	23.5	16.3	17.8	Sandy loam	1.80	4.04	0.92
CR	35-60	50.8	15.8	13.5	19.9	Sandy loam	3.22	4.93	0.68
R									
P12 - Dystric Cambisol (Pantoloamic, Raptic)/CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico típico									
Ah1	0-5	41.6	21.4	15.7	21.2	Sandy clay loam	1.94	4.01	0.74
Ah2	5-40	38.8	22.4	15.3	23.4	Sandy clay loam	1.73	4.00	0.65
Bw1	40-65	37.7	18.7	13.9	29.7	Sandy clay loam	2.02	4.06	0.47
2Bw2	65-82	39.3	14.8	19.1	26.8	Sandy clay loam	2.66	2.83	0.71
2BC	82-92	44.0	15.7	14.6	25.8	Sandy clay loam	2.80	4.09	0.57
2C	92-105	48.8	16.6	13.2	21.5	Sandy clay loam	2.94	4.95	0.61
2CR	105-150+	55.5	13.7	13.2	17.6	Sandy loam	4.05	5.24	0.75
P13 - Eutric Regosol (Loamic, Amphiarenic, Humic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico									

Continue

Continuation

Horizon	Depth (cm)	CS	FS	Silt	Clay	Texture	CS/FS	FS/Silt	Silt/Clay
		----- % -----							
Ah	0-15	54.7	20.6	9.4	15.3	Sandy loam	2.66	8.01	0.61
AC	15-40	54.9	27.9	6.0	11.3	Loamy sand	1.97	13.80	0.53
CR	40-90+	51.0	21.8	14.5	12.7	Sandy loam	2.34	5.02	1.14
P14 - Haplic Phaeozem (Pantoloamic, Humic, Raptic)/NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico fragmentário									
Ah1	0-8	41.6	24.6	12.8	21.0	Sandy clay loam	1.69	5.17	0.61
2Ah2	8-20	34.9	29.8	14.7	20.6	Sandy clay loam	1.17	4.40	0.71
2C	20-30	35.8	29.5	10.8	23.9	Sandy clay loam	1.21	6.05	0.45
2CR	30-40	38.8	28.2	16.8	16.3	Sandy loam	1.38	3.99	1.03
R									
P15 - Eutric Regosol (Epiarenic, Amphiloamic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico									
A	0-5	59.5	19.6	14.0	6.9	Loamy sand	3.04	5.65	2.03
AC1	5-15	63.9	19.1	12.6	4.4	Loamy sand	3.35	6.59	2.86
AC2	15-30	65.3	15.3	15.1	4.3	Loamy sand	4.27	5.34	3.51
C	30-60	59.5	15.5	15.1	9.9	Sandy loam	3.84	4.97	1.53
R									
P16 - Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Raptic, Endogleyic)/GLEISSOLO MELÂNICO Tb Distrófico plintossólico									
Ah1	0-5	24.4	18.3	18.0	39.3	Clay loam	1.33	2.37	0.46
2Ah2	5-25	47.9	15.0	9.9	27.2	Sandy clay loam	3.19	6.35	0.36
2A3	25-60	47.7	13.4	10.1	28.8	Sandy clay loam	3.56	6.05	0.35
2AC	60-94	46.5	8.2	11.0	34.3	Sandy clay loam	5.67	4.97	0.32
2Cg1	94-130	49.2	12.1	10.3	28.3	Sandy clay loam	4.07	5.95	0.36
2Cg2	130-310+	35.4	12.8	17.2	34.6	Sandy clay loam	2.77	2.80	0.50
P17 - Haplic Phaeozem (Epiloamic, Panpaic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico saprolítico									
Ah	0-3	55.8	15.0	16.4	12.7	Sandy loam	3.72	4.32	1.29
2Ahb	3-20	54.3	17.9	12.1	15.7	Sandy loam	3.03	5.97	0.77
C1	20-30	55.3	10.9	16.0	17.8	Sandy loam	5.07	4.14	0.90
C2	30-40	47.4	13.1	16.6	22.9	Sandy clay loam	3.62	3.64	0.72
Ce	40-45+	37.4	9.5	12.8	40.3	Sandy clay	3.94	3.66	0.32
P18 - Haplic Phaeozem (Pantoloamic, Panpaic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico									
Ah1	0-10	47.8	17.9	14.0	20.3	Sandy clay loam	2.67	4.69	0.69
Ah2	10-20	51.4	20.2	14.1	14.2	Sandy loam	2.54	5.08	0.99

Continue

Continuation

Horizon	Depth (cm)	CS	FS	Silt	Clay	Texture	CS/FS	FS/Silt	Silt/Clay
		----- % -----							
2Ahb	20-35	56.0	17.7	11.0	15.3	Sandy loam	3.16	6.70	0.72
2AC	35-65	55.0	18.6	14.1	12.4	Sandy loam	2.96	5.22	1.14
2Ce	65-80+	61.9	15.6	14.6	7.9	Sandy loam	3.97	5.31	1.85
P19 - Haplic Umbrisol (Pantoloami, Eutric)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico									
Ah	0-3	56.2	12.2	11.0	20.6	Sandy clay loam	4.61	6.22	0.53
A	3-25	62.7	15.7	9.3	12.4	Sandy loam	3.99	8.43	0.75
C	25-45	62.8	15.6	9.0	12.6	Sandy loam	4.03	8.71	0.71
Ce	45-70+	62.8	15.6	9.0	12.6	Sandy loam	4.03	8.71	0.71
P20 - Salic Vertisol (Hypereutric, Epic, Gleyic)/VERTISSOLO HIDROMÓRFICO Órtico típico									
A	0-45	38.9	14.8	17.3	29.0	Sandy clay loam	2.63	3.10	0.60
2Bvn	45-110+	13.8	8.0	18.7	59.5	Clay	1.73	1.17	0.31
P21 - Eutric Leptosol (Loamic)/NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico									
Ap	0-20	53.1	20.3	16.8	9.8	Sandy loam	2.62	4.37	1.71
R									
<i>Typical Caatinga soils</i>									
P22 - Eutric Yermic Regosol (Pantoloamic, Saprolithic)/NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico									
Ap	0-15	40.3	17.4	3.8	38.5	Sandy clay loam	2.32	15.18	0.10
C	15-35	34.7	26.6	2.8	36.1	Sandy clay loam	1.30	21.89	0.08
R									
P23 - Yermic Vertic Luvisol (Epiloamic, Clayic, Hypereutric, Epic)/LUVISSOLO CRÔMICO Órtico vertissólico									
A	0-10	26.4	27.6	21.5	24.6	Sandy clay loam	0.96	2.51	0.87
B	10-40	33.3	19.7	19.6	27.4	Sandy clay loam	1.69	2.70	0.72
Bt	40-45	23.8	12.9	20.0	43.3	Clay	1.84	1.84	0.46
R									
P24 - Yermic Fluvic Cambisol (Polyarenic, Polyloamic)/CAMBISSOLO FLÚVICO Ta eutrófico típico									
A	0-18	31.8	49.8	4.6	13.9	Sandy loam	0.64	17.74	0.33
2Bw1	18-32	46.1	30.9	5.6	17.4	Sandy loam	1.49	13.75	0.32
3Bw2	32-75	52.0	30.9	1.5	15.6	Sandy loam	1.68	55.27	0.10
4C	75-104	72.0	15.8	1.8	10.4	Loamy sand	4.56	48.78	0.17
5Bw3	104-115	49.8	32.8	2.6	14.8	Sandy loam	1.52	31.77	0.18
6C	115-140	58.7	26.5	2.1	12.7	Loamy sand	2.22	40.57	0.17

Continue

Continuation

Horizon	Depth (cm)	CS	FS	Silt	Clay	Texture	CS/FS	FS/Silt	Silt/Clay
		----- % -----							
7Bw4	140-180	41.2	37.0	4.7	17.0	Sandy loam	1.11	16.64	0.28
7Bw5	180-190	43.1	36.6	5.1	15.1	Sandy loam	1.18	15.63	0.34
7Bw6	190-230+	39.1	38.6	5.8	16.5	Sandy loam	1.01	13.40	0.35
P25 - Yermic Leptic Luvisol (Epiclayic, Epiloamic, Epic/ LUVISSOLO HÁPLICO Órtico típico									
BA	0-10	27.0	19.0	13.0	41.0	Sandy clay	1.44	3.57	0.31
Bt	10-30	27.0	23.0	19.0	32.0	Sandy clay loam	1.19	2.67	0.58
BC	30-50	23.0	24.0	31.0	22.0	Loam	0.96	1.50	1.45
R									
P26 - Yermic Vertic Luvisol (Pantoloamic, Epic)/LUVISSOLO CRÔMICO Órtico vertissólico									
A	0-5	32.0	39.0	15.0	14.0	Sandy loam	0.83	4.72	1.10
AB	5-20	32.0	36.0	16.0	16.0	Sandy loam	0.87	4.22	1.01
Bt	20-40	31.0	24.0	11.0	34.0	Sandy clay loam	1.31	4.84	0.33
R									
P27 - Yermic Luvisol (Pantoloamic, Epic)/LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico									
A	0-10	30.0	35.0	19.0	16.0	Sandy loam	0.85	3.43	1.20
Bt	10-30	35.0	29.0	17.0	20.0	Sandy loam	1.23	3.83	0.83
C	30-50	31.0	28.0	23.0	18.0	Sandy loam	1.11	2.63	1.28
R									
P28 - Eutric Regosol (Epiloamic, Amphiarenic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico léptico									
Ap	0-16	43.1	36.8	9.8	10.3	Sandy loam	1.17	8.15	0.95
A	16-54	44.7	36.4	11.8	7.1	Loamy sand	1.23	6.87	1.66
CA	54-70	45.0	36.8	9.7	8.5	Loamy sand	1.22	8.43	1.14
C	70-80	46.2	35.4	10.2	8.2	Loamy sand	1.31	8.00	1.24
R									
P29 - Yermic Luvisol (Pantoloamic, Epic) /LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico									
Ap	0-13	26.0	33.9	15.0	25.1	Sandy clay loam	0.77	3.99	0.60
AB	13-32	26.5	43.0	9.9	20.6	Sandy clay loam	0.62	7.02	0.48
Bt1	32-45	27.2	32.4	18.0	22.4	Sandy clay loam	0.84	3.31	0.80
Bt2	45-75	33.1	26.5	11.3	29.1	Sandy clay loam	1.25	5.27	0.39
R									
P30 - Yermic Luvisol (Pantoclayic, Epic)/LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico									

Continue

									Conclusion
Horizon	Depth (cm)	CS	FS	Silt	Clay	Texture	CS/FS	FS/Silt	Silt/Clay
		----- % -----							
A	0-15	13.2	27.8	2.9	56.1	Clay	0.47	14.14	0.05
Bt	15-35	11.3	21.6	4.8	62.2	Clay	0.52	6.85	0.08
C	35-52+	10.7	22.8	4.5	62.0	Clay	0.47	7.44	0.07
P31 - Yermic Luvisol (Pantoclayic, Epic)/LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico									
A	0-15	32.4	27.6	0.3	39.7	Sandy clay	1.17	200.00	0.01
Bt	15-45	29.2	16.9	6.4	47.5	Sandy clay	1.73	7.20	0.13
R									

SOURCE: Elaboration by author (2024).

The soils vary between strongly acidic and very strongly alkaline. The acidic soils have an average potential acidity up to two times higher than the alkaline soils (Table 5). The ΔpH is negative at all horizons. In general, the sum of bases (SB), the effective cation exchange capacity (ECEC) and cation exchange capacity (CEC), soil organic carbon (C), and total nitrogen (N) reduce with increasing depth, indicating that the chemical properties of the soil are directly associated with the input of organic residues. The average ECEC is 44% lower than the CEC. Remaining phosphorus (P_{REM}) values below 20 mg L⁻¹, suggest high P adsorption capacity in subsurface horizons associated with an advanced stage of weathering and pedogenesis.

TABLE 5 - CHEMICAL PROPERTIES.

Horizon	Depth (cm)	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	P _M mg/dm ³	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	ECEC	CEC	V	m	NaS	C	N	C/N	P _{REM} mg L ⁻¹
----- cmol _e /dm ³ ----- % -----																					
GIF soils																					
P1 - Someric Umbrisol (Pantoloamic, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico típico																					
Ah1	0-10	5.27	4.24	-1.03	28.6	1.58	0.15	6.96	3.11	0.06	10.6	11.80	11.86	22.40	52.7	0.5	0.67	8.02	0.441	18.18	32.5
2Ah2	10-32	4.82	3.73	-1.09	6.3	0.94	0.17	1.78	0.68	1.17	9.4	3.57	4.74	12.97	27.5	24.7	1.32	2.83	0.180	15.72	23.0
2AC	32-50	4.27	3.45	-0.82	1.4	0.17	0.28	0.20	0.12	2.73	10.0	0.78	3.51	10.78	7.2	77.8	2.64	1.15	0.122	9.46	20.4
3Ahb	50-65	4.77	3.59	-1.18	2.0	0.15	0.23	0.17	0.13	2.94	9.7	0.68	3.62	10.38	6.6	81.2	2.21	1.41	0.114	12.36	11.8
3Ce1	65-90	5.27	3.77	-1.50	2.5	0.07	0.23	0.07	0.10	2.29	7.4	0.46	2.75	7.86	5.9	83.3	2.89	0.42	0.070	5.97	5.4
3Ce2	90-115+	5.25	3.67	-1.58	1.6	0.06	0.21	0.05	0.13	2.42	5.3	0.45	2.87	5.75	7.8	84.3	3.73	0.40	0.043	9.31	11.0
P2 - Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Hyperdystric, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico																					
Ah1	0-5	4.97	3.67	-1.30	16.3	0.44	0.17	3.56	1.41	0.65	17.5	5.58	6.23	23.08	24.2	10.4	0.72	18.96	0.868	21.84	28.3
2Ah2	5-25	4.46	3.50	-0.96	4.5	0.14	0.10	0.54	0.22	2.11	14.8	0.99	3.10	15.79	6.3	68.1	0.60	5.32	0.408	13.04	20.4
2Ah3	25-55	4.44	3.77	-0.67	1.6	0.07	0.10	0.05	0.05	2.25	11.8	0.27	2.52	12.07	2.2	89.3	0.79	3.00	0.191	15.73	6.9
2AC	55-75	4.80	4.06	-0.74	1.5	0.03	0.07	0.04	0.02	1.17	7.6	0.16	1.33	7.76	2.1	88.0	0.87	1.57	0.137	11.47	4.2
2C	75-95+	4.90	4.14	-0.76	1.3	0.03	0.07	0.03	0.03	0.92	5.9	0.16	1.08	6.06	2.6	85.2	1.15	1.00	0.114	8.80	4.0
P3 - Dystric Regosol (Pantoloamic, Humic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico																					
A1	0-2	6.71	6.02	-0.69	28.1	0.29	0.09	3.58	2.01	0.00	1.4	5.97	5.97	7.37	81.0	0.0	1.21	1.98	0.113	17.50	46.3
A2	2-10	6.27	5.29	-0.98	11.7	0.20	0.09	2.67	1.57	0.00	3.0	4.53	4.53	7.53	60.2	0.0	1.16	1.10	0.086	12.81	45.8
CA	10-25	4.57	3.40	-1.17	3.9	0.13	0.07	0.59	0.37	1.40	5.5	1.16	2.56	6.66	17.4	54.7	1.08	1.13	0.074	15.21	42.0
CR	25-55+	4.58	3.37	-1.21	2.2	0.11	0.08	0.68	0.34	1.67	5.4	1.20	2.87	6.60	18.2	58.2	1.15	1.05	0.071	14.79	39.8
P4 - Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Hyperdystric, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico																					
Ah1	0-8	4.97	3.89	-1.08	19.4	0.29	0.49	4.33	1.47	0.27	10.6	6.58	6.85	17.18	38.3	3.9	2.84	6.18	0.308	20.07	41.5
2Ah2	8-22	4.19	3.42	-0.77	4.0	0.13	0.20	0.41	0.15	2.67	12.9	0.89	3.56	13.79	6.5	75.0	1.43	2.18	0.355	6.13	17.7
2Ah3	22-70	4.32	3.77	-0.55	2.5	0.07	0.10	0.05	0.02	2.05	10.0	0.24	2.29	10.24	2.3	89.5	1.00	1.61	0.131	12.31	12.0

Continue

Horizon	Depth (cm)	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	P _M mg/dm ³	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	ECEC	CEC	V	m	NaS	C	N	C/N	P _{REM} mg L ⁻¹
P5 - Dystric Regosol (Pantoloamic, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico																					
A	0-4	4.67	3.70	-0.97	56.8	0.79	0.47	2.30	0.83	0.46	7.3	4.39	4.85	11.69	37.6	9.5	4.00	2.45	0.164	14.92	43.9
2Ab	4-18	4.27	3.00	-1.27	28.3	0.19	0.36	0.14	0.09	2.42	7.3	0.78	3.20	8.08	9.7	75.6	4.47	0.84	0.091	9.18	34.9
Ce	18-55+	4.73	2.85	-1.88	112.8	0.19	0.23	0.12	0.09	2.55	5.0	0.63	3.18	5.63	11.2	80.2	4.00	0.29	0.025	11.60	43.6
P6 - Cambic Someric Umbrisol (Pantoloamic, Humic, Panpaic)/CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico típico																					
Ah	0-8	6.05	4.75	-1.30	25.7	1.98	0.16	2.82	1.62	0.00	4.1	6.58	6.58	10.68	61.6	0.0	1.48	2.00	0.164	12.20	45.0
2Ahb1	8-20	4.62	3.62	-1.00	7.8	0.33	0.09	0.72	0.42	0.98	5.8	1.55	2.53	7.35	21.1	38.7	1.16	1.25	0.070	17.90	34.3
3Ahb2	20-45	4.84	3.57	-1.27	2.2	0.20	0.10	0.47	0.33	2.07	7.6	1.09	3.16	8.69	12.5	65.5	1.12	1.15	0.089	12.90	18.1
4Ahb3	45-90	4.86	3.70	-1.16	1.8	0.16	0.11	0.30	0.17	2.32	8.4	0.75	3.07	9.15	8.2	75.6	1.24	1.03	0.096	10.75	11.4
5Bw	90-125	5.04	3.84	-1.20	2.7	0.08	0.13	0.24	0.10	2.46	7.3	0.55	3.01	7.85	7.0	81.7	1.68	0.59	0.082	7.21	4.7
Ce	125-145+	4.98	3.58	-1.40	1.0	0.08	0.12	0.45	0.22	2.55	5.3	0.88	3.43	6.18	14.2	74.3	1.97	0.32	0.064	5.08	12.2
P7 - Haplic Phaeozem (Pantoloamic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico																					
Ah1	0-10	6.38	5.45	-0.93	30.1	0.94	0.06	9.70	3.99	0.00	3.0	14.69	14.69	17.69	83.0	0.0	0.35	5.03	0.365	13.78	51.1
2Ah2	10-25	5.94	4.49	-1.45	4.9	0.31	0.18	3.84	2.61	0.00	2.4	6.94	6.94	9.34	74.3	0.0	1.90	1.04	0.074	14.03	48.9
2CA	25-95	6.15	4.30	-1.85	37.3	0.12	0.23	3.56	2.19	0.00	1.3	6.10	6.10	7.40	82.4	0.0	3.13	0.23	0.033	6.85	52.8
2C	95-105+	6.72	5.00	-1.72	19.5	0.11	0.47	3.68	2.98	0.00	0.6	7.23	7.23	7.83	92.3	0.0	5.95	0.23	0.027	8.59	54.3
P8 - Eutric Regosol (Epiarenic, Katoloamic, Humic, Panpaic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico léptico éutrico																					
Ah	0-5	5.94	5.16	-0.78	24.1	0.33	0.04	3.31	0.74	0.00	1.4	4.42	4.42	5.82	75.9	0.0	0.62	1.07	0.062	17.21	50.0
2Ahb1	5-25	5.42	4.41	-1.01	12.4	0.38	0.05	3.91	0.74	0.10	4.2	5.08	5.08	9.28	54.7	0.0	0.58	3.06	0.161	18.99	43.4
3Ahb2	25-50	5.24	4.27	-0.97	6.6	0.26	0.06	4.3	0.69	0.10	5.0	5.32	5.42	10.32	51.6	1.8	0.61	3.06	0.161	18.99	39.0

Continue

Continuation

Horizon	Depth (cm)	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	P _w mg/dm ³	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺ cmol _c /dm ³	H + Al	SB	ECEC	CEC	V	m	NaS ----- %	C	N	C/N	P _{REM} mg L ⁻¹
CR	50-90	5.02	4.02	-1.00	7.5	0.18	0.06	2.84	0.40	0.57	5.0	3.48	4.05	8.48	41.0	14.1	0.74	1.72	0.130	13.21	34.7
R																					
P9 - Someric Umbrisol (Epiloamic, Katoarenic, Eutric, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico fragmentário																					
Ah1	0-5	5.65	4.77	-0.88	31.2	0.26	0.12	6.96	1.56	0.00	6.4	8.9	8.9	15.3	58.2	0.0	0.75	8.40	0.330	25.47	44.2
2Ah2	05-35	4.94	3.91	-1.03	21.9	0.16	0.07	2.12	0.58	0.86	4.6	2.93	3.79	7.53	38.9	22.7	0.95	1.22	0.068	18.00	37.0
2C	35-60	5.02	3.95	-1.07	25	0.14	0.05	1.70	0.45	0.76	4.2	2.34	3.1	6.54	35.8	24.5	0.69	0.96	0.037	25.87	33.1
R																					
P10 - Dystric Regosol (Pantoloamic, Ochric)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico saprolítico																					
Ah	0-8	5.10	4.29	-0.81	17.4	0.33	0.09	4.32	1.48	0.19	5.3	6.22	6.41	11.52	54.0	3.0	0.77	3.06	0.163	18.75	41.8
AC	8-30	4.59	3.72	-0.87	3.8	0.11	0.02	1.12	0.22	2.10	5.7	1.46	3.56	7.16	20.4	59.0	0.26	0.92	0.062	14.78	23.8
C	30-50	4.60	3.66	-0.94	1.5	0.05	0.05	1.01	0.15	2.95	5.5	1.26	4.21	6.76	18.6	70.1	0.67	0.38	0.056	6.84	20.9
Cr	50-100	5.06	3.56	-1.50	0.6	0.03	0.12	1.80	0.23	2.57	3.8	2.18	4.75	5.98	36.5	54.1	2.07	0.23	0.031	7.48	23.9
R																					
P11 - Eutric Regosol (Pantoloamic, Ochric)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico leptofragmentário																					
Ah	0-8	5.95	5.22	-0.73	9.5	0.55	0.08	7.07	1.77	0.00	2.0	9.47	9.47	11.47	82.6	0.0	0.70	2.29	0.172	13.32	42.2
AC	8-35	5.17	3.84	-1.33	2.4	0.14	0.15	3.15	1.72	0.67	3.1	5.16	5.83	8.26	62.5	11.5	1.82	0.77	0.065	11.78	40.1
CR	35-60	5.28	3.73	-1.55	1.6	0.06	0.20	2.68	3.44	0.67	2.5	6.38	7.05	8.88	71.8	9.5	2.28	0.31	0.034	9.04	39.6
R																					
P12 - Dystric Cambisol (Pantoloamic, Raptic)/CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico típico																					
Ah1	0-5	5.17	4.19	-0.98	11.1	0.60	0.20	3.92	1.54	0.29	6.3	6.27	6.56	12.57	49.9	4.4	1.61	4.39	0.225	19.51	31.2
Ah2	5-40	4.63	3.77	-0.86	2.6	0.18	0.05	1.22	0.29	3.14	6.8	1.73	4.87	8.53	20.3	64.5	0.53	1.91	0.141	13.53	20.9
Bw1	40-65	4.83	3.89	-0.94	0.5	0.05	0.03	0.56	0.04	2.76	5.7	0.68	3.44	6.38	10.7	80.2	0.43	1.33	0.087	15.33	11.2
2Bw2	65-82	4.64	4.00	-0.64	0.5	0.04	0.05	0.67	0.01	2.00	5.0	0.77	2.77	5.77	13.3	72.2	0.78	0.92	0.090	10.18	7.5

Continue

Continuation

Horizon	Depth (cm)	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	P _w mg/dm ³	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	ECEC	CEC	V	m	NaS	C	N	C/N	P _{REM} mg L ⁻¹
----- % -----																		----- % -----			
2BC	82-92	4.69	4.13	-0.56	0.6	0.04	0.04	0.67	-0.01	1.43	4.1	0.73	2.16	4.83	15.1	66.2	0.75	0.77	0.076	10.07	7.7
2C	92-105	4.66	4.16	-0.50	0.7	0.02	0.03	0.66	0.00	1.24	3.8	0.71	1.95	4.51	15.7	63.6	0.61	0.84	0.065	12.94	8.1
2CR	105-150+	5.07	4.25	-0.82	2.8	0.02	0.06	0.68	0.00	1.05	3.0	0.76	1.81	3.76	20.2	58.0	1.67	0.46	0.045	10.18	9.6
P13 - Eutric Regosol (Loamic, Amphiarenic, Humic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico																					
Ah	0-15	5.63	4.85	-0.78	17.8	0.91	0.26	4.64	2.26	<0.1	3.9	8.07	8.07	11.97	67.4	0.0	2.13	3.44	0.211	16.30	46.8
AC	15-40	5.17	3.90	-1.27	3.9	0.58	0.12	1.07	0.90	0.57	4.1	2.66	3.23	6.76	39.3	17.6	1.70	1.15	0.065	17.67	47.3
CR	40-90+	5.06	3.74	-1.32	0.8	0.63	0.19	0.66	0.97	0.86	3.0	2.45	3.31	5.45	45	26.0	3.56	0.69	0.028	24.65	43.8
P14 - Haplic Phaeozem (Pantoloamic, Humic, Raptic)/NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico fragmentário																					
Ah1	0-8	6.02	5.33	-0.69	17.2	0.91	0.31	9.36	3.32	<0.1	3.3	13.9	13.9	17.2	80.8	0.0	1.79	6.11	0.296	20.65	44.8
2Ah2	8-20	5.09	3.85	-1.24	2.6	0.60	0.52	2.70	2.27	0.38	4.7	6.09	6.47	10.79	56.4	5.9	4.80	1.83	0.113	16.22	43.9
2C	20-30	5.02	3.61	-1.41	1.7	0.48	0.83	1.97	2.25	1.05	4.2	5.54	6.59	9.74	56.9	15.9	8.56	1.30	0.082	15.84	37.0
2CR	30-40	5.02	3.45	-1.57	1.7	0.31	1.23	1.46	1.85	1.14	4.1	4.85	5.99	8.95	54.2	19.0	13.77	0.68	0.065	10.44	39.2
R																					
P15 - Eutric Regosol (Epiarenic, Amphiloamic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico																					
A	0-5	7.16	6.53	-0.63	10.7	0.29	0.03	8.07	1.69	0.29	0.6	10.09	10.38	10.69	94.4	2.8	0.31	1.28	-	-	44.9
AC1	5-15	6.71	5.58	-1.13	3.2	0.19	0.02	3.42	0.96	<0.1	1.0	4.59	4.59	5.59	82.1	0.0	0.29	0.27	-	-	45.7
AC2	15-30	6.70	5.30	-1.40	2.7	0.12	0.03	3.00	1.40	<0.1	0.8	4.56	4.56	5.36	85.1	0.0	0.62	0.14	-	-	47.4
C	30-60	6.10	4.41	-1.69	2.6	0.10	0.13	2.73	1.67	<0.1	1.3	4.63	4.63	5.93	78.1	0.0	2.16	0.09	-	-	42.7
R																					
P16 - Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Raptic, Endogleyic)/GLEISSOLO MELÂNICO Tb Distrófico plintossólico																					
Ah1	0-5	4.33	3.84	-0.49	17.8	0.37	0.19	3.89	1.95	0.68	11.7	6.39	7.07	18.09	35.3	9.6	1.04	5.39	0.418	12.89	31.4
2Ah2	5-25	4.09	3.61	-0.48	5.8	0.24	0.06	0.21	0.46	3.20	7.0	0.97	4.17	7.97	12.2	76.7	0.81	0.88	0.075	11.68	20.5
2A3	25-60	4.29	3.62	-0.67	7.1	0.26	0.13	0.07	0.91	3.68	6.6	1.37	5.05	7.97	17.2	72.9	1.66	0.51	0.053	9.63	18.0

Continue

Continuation

Horizon	Depth (cm)	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	P _w mg/dm ³	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	ECEC	CEC	V	m	NaS	C	N	C/N	P _{REM} mg L ⁻¹
----- % -----																					
2AC	60-94	4.59	3.52	-1.07	14.3	0.10	0.37	0.03	2.06	3.10	5.9	2.56	5.66	8.46	30.3	54.8	4.42	0.15	0.047	3.09	21.9
2Cg1	94-130	4.69	3.67	-1.02	16.2	0.05	0.47	0.05	2.15	2.42	4.8	2.73	5.15	7.53	36.3	47.0	6.26	0.15	0.028	5.18	24.5
2Cg2	130-310+	4.77	3.40	-1.37	54.0	0.06	2.11	0.03	6.16	4.65	8.3	8.35	13.00	16.65	50.2	35.8	12.65	0.08	0.014	5.39	23.3
P17 - Haplic Phaeozem (Epiloamic, Panpaic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico saprolítico																					
Ah	0-3	6.03	5.05	-0.98	32.3	0.69	0.12	5.32	2.26	0.00	3.7	8.39	8.39	12.09	69.4	0.0	0.98	2.77	0.172	16.12	49.3
2Ahb	3-20	5.76	4.00	-1.76	5.0	0.27	0.15	2.02	1.00	0.15	3.4	3.45	3.60	6.85	50.4	4.2	2.21	1.15	0.077	14.99	49.3
C1	20-30	5.62	3.77	-1.85	3.9	0.25	0.24	1.55	1.01	0.42	4.0	3.05	3.47	7.05	43.3	12.1	3.35	1.10	0.077	14.24	45.4
C2	30-40	5.68	3.52	-2.16	2.8	0.16	0.51	1.44	1.74	0.88	3.9	3.85	4.73	7.75	49.7	18.6	6.62	0.38	0.059	6.39	43.2
Ce	40-45+	5.31	3.36	-1.95	1.9	0.14	1.06	2.23	3.51	1.34	4.3	6.94	8.28	11.24	61.7	16.2	9.44	0.45	0.056	7.98	37.8
P18 - Haplic Phaeozem (Pantoloamic, Panpaic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico																					
Ah1	0-10	5.90	4.87	-1.03	9.9	0.32	0.10	5.53	3.06	0.00	4.6	9.01	9.01	13.61	66.2	0.0	0.74	5.28	0.330	15.99	55.9
Ah2	10-20	5.82	4.49	-1.33	3.9	0.29	0.13	2.12	1.95	0.00	2.7	4.49	4.49	7.19	62.4	0.0	1.79	1.40	0.093	15.03	53.2
2Ahb	20-35	5.53	4.25	-1.28	1.4	0.25	0.20	0.96	1.58	0.00	2.0	3.00	3.00	5.00	60.0	0.0	4.09	0.71	0.059	11.99	52.7
2AC	35-65	6.10	4.82	-1.28	11.4	0.13	0.45	1.02	1.98	0.00	1.0	3.59	3.59	4.59	78.2	0.0	9.91	0.39	0.036	10.96	52.2
2Ce	65-80+	6.54	4.25	-2.29	2.4	0.07	0.23	0.39	0.95	0.00	0.7	1.64	1.64	2.34	70.1	0.0	9.79	0.07	0.018	3.87	55.0
P19 - Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Eutric)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico																					
Ah	0-3	5.27	4.07	-1.20	21.1	0.39	0.06	4.75	1.07	0.12	8.2	6.27	6.39	14.47	43.3	1.9	0.45	4.33	0.235	18.44	46.5
A	3-25	5.02	3.69	-1.33	5.0	0.22	0.03	1.17	0.49	0.38	3.5	1.92	2.30	5.42	35.4	16.5	0.60	0.85	0.060	14.21	47.7
C	25-45	4.99	3.62	-1.37	4.5	0.21	0.02	0.74	0.32	0.86	3.6	1.29	2.15	4.89	26.4	40.0	0.38	0.56	0.044	12.79	41.0
Ce	45-70+	4.98	3.66	-1.32	4.0	0.20	0.02	0.45	0.22	1.48	4.3	0.89	2.37	5.19	17.1	62.4	0.38	0.47	0.038	12.36	35.3
P20 - Salic Vertisol (Hypereutric, Epic, Gleyic)/VERTISSOLO HIDROMÓRFICO Órtico típico																					
A	0-45	7.20	5.66	-1.54	667.8	1.28	2.42	6.64	2.65	<0.1	0.6	12.99	12.99	13.59	95.6	0.0	17.83	0.44	0.066	6.59	51.4

Continue

Continuation

Horizon	Depth (cm)	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	P _w mg/dm ³	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺ cmol _c /dm ³	H + Al	SB	ECEC	CEC	V	m	NaS %	C	N	C/N	P _{REM} mg L ⁻¹
2Bvn	45-110+	9.43	7.35	-2.08	1321.1	2.17	20.69	3.45	0.83	<0.1	<0.1	27.14	27.14	27.14	100	0.0	76.24	0.33	0.059	5.60	30.2
P21 - Eutric Leptosol (Loamic)/NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico																					
Ap	0-20	6.23	5.19	-1.04	19	0.91	0.12	4.16	1.3	0.0	0.9	6.49	6.49	7.39	87.8	0.0	1.68	0.53	0.062	8.61	50.7
R																					
Typical Caatinga soils																					
P22 - Eutric Yermic Regosol (Pantoloamic, Saprolithic)/NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico																					
Ap	0-15	6.47	4.48	-1.99	1.6	0.16	0.34	5.08	1.81	<0.1	1.6	7.39	7.39	8.99	82.2	0.0	3.74	0.09	-	-	42.0
C	15-35	6.87	5.79	-1.08	15.0	1.25	0.13	8.74	2.2	<0.1	2.4	12.32	12.32	14.72	83.7	0.0	0.91	1.29	-	-	43.8
R																					
P23 - Yermic Vertic Luvisol (Epiloamic, Clayic, Hypereutric, Epic)/LUVISSOLO CRÔMICO Órtico vertissólico																					
A	0-10	6.31	4.67	-1.64	9.6	0.43	0.09	12.92	4.21	0.0	1.1	17.65	17.65	18.75	94.1	0.0	0.47	1.15	0.048	23.93	39.8
B	10-40	6.53	4.85	-1.68	2.0	0.17	0.28	19.53	5.68	0.0	0.8	25.66	25.66	26.46	97	0.0	1.06	0.61	0.037	16.46	37.4
Bt	40-45	7.08	5.00	-2.08	4.3	0.06	1.10	25.13	13.53	0.0	0.5	39.82	39.82	40.32	98.8	0.0	2.73	0.23	0.023	10.09	41.0
R																					
P24 - Yermic Fluvisol Cambisol (Polyarenic, Polyloamic, Polyloamic)/CAMBISSOLO FLÚVICO Ta eutrófico típico																					
A	0-18	6.66	5.48	-1.18	151.5	0.46	0.02	2.64	1.23	0.0	0.5	4.35	4.35	4.85	89.7	0.0	0.36	0.14	0.020	6.96	54.0
2Bw1	18-32	6.49	5.17	-1.32	303.6	0.45	0.20	4.76	2.22	0.0	0.8	7.63	7.63	8.43	90.5	0.0	2.37	0.17	0.022	7.91	51.6
3Bw2	32-75	6.34	5.78	-0.56	498.8	0.29	0.17	4.87	2.19	0.0	0.3	7.51	7.51	7.81	96.2	0.0	2.12	0.12	0.014	8.29	53.9
4C	75-104	6.32	6.01	-0.31	496.1	0.24	0.26	3.91	2.17	0.0	0.2	6.58	6.58	6.78	97.1	0.0	3.85	0.07	0.014	4.97	56.3
5Bw3	104-115	6.45	6.12	-0.33	626.0	0.37	0.63	5.46	2.48	0.0	0.3	8.94	8.94	9.24	96.8	0.0	6.78	0.09	0.012	7.25	53.9
6C	115-140	6.71	6.28	-0.43	512.7	0.39	0.85	4.05	2.22	0.0	0.3	7.51	7.51	7.81	96.2	0.0	10.91	0.07	0.014	4.97	53.4
7Bw4	140-180	8.73	7.33	-1.40	584.7	0.72	1.18	4.62	2.44	0.0	0.0	8.97	8.97	8.97	100	0.0	13.18	0.09	0.011	7.91	47.5

Continue

Continuation

Horizon	Depth (cm)	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	P _w mg/dm ³	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺ cmol/dm ³	H + Al	SB	ECEC	CEC	V	m	NaS %	C	N	C/N	P _{REM} mg L ⁻¹
7Bw5	180-190	9.03	7.72	-1.31	708.9	0.70	1.30	3.77	2.27	0.0	0.0	8.05	8.05	8.05	100	0.0	16.20	0.03	0.012	2.42	40.8
7Bw6	190-230+	8.87	7.71	-1.16	632.9	0.77	1.65	3.80	2.83	0.0	0.0	9.06	9.06	9.06	100	0.0	18.24	0.06	0.010	5.80	39.0
P25 - Yermic Leptic Luvisol (Epicalytic, Epiloamic, Epic/LUVISSOLO HÁPLICO Órtico típico)																					
BA	0-10	7.26	5.07	-2.19	1.5	0.09	0.43	16.88	8.68	0.00	0.80	26.07	26.07	26.87	97.00	0.00	1.58	0.31	0.040	7.69	40.9
Bt	10-30	7.57	5.47	-2.10	13.8	0.05	0.65	16.41	7.32	0.00	0.60	24.43	24.43	25.03	97.60	0.00	2.59	0.31	0.030	10.25	48.0
BC	30-50	8.12	5.31	-2.81	107.7	0.03	1.04	21.38	8.87	0.00	0.30	31.32	31.32	31.62	99.10	0.00	3.29	0.08	0.010	7.54	51.2
R																					
P26 - Yermic Vertic Luvisol (Pantoloamic, Epic/LUVISSOLO CRÓMICO Órtico vertissólico)																					
A	0-5	6.12	-	-	8.2	0.00	0.00	4.36	1.93	0.00	1.70	6.80	6.83	8.53	80.10	0.00	0.55	0.86	0.080	10.75	43.1
AB	5-20	5.73	-	-	1.0	0.00	0.00	4.08	2.24	0.19	2.50	6.70	6.84	9.15	72.70	2.80	1.57	0.39	0.050	7.80	39.5
Bt	20-40	6.15	-	-	0.8	0.00	0.01	9.33	6.67	0.00	2.20	17.70	17.67	19.87	88.90	0.00	7.93	0.39	0.050	7.80	43.9
R																					
P27 - Yermic Luvisol (Pantoloamic, Epic/LUVISSOLO CRÓMICO Órtico típico)																					
A	0-10	6.09	-	-	23.2	0.00	0.00	5.00	1.33	0.00	2.30	6.90	6.94	9.24	75.10	0.00	0.79	1.56	0.110	14.18	49.5
Bt	10-30	5.63	-	-	1.1	0.00	0.00	4.11	1.74	0.38	2.50	6.10	6.44	8.56	70.80	5.90	1.78	0.39	0.040	9.75	40.6
C	30-50	5.73	-	-	1.0	0.00	0.00	4.73	2.06	0.28	2.50	7.00	7.32	9.24	73.80	3.80	2.06	0.16	0.040	4.00	46.8
R																					
P28 - Eutric Regosol (Epiloamic, Amphiarenic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico léptico																					
Ap	0-16	7.37	6.95	-0.42	355.7	0.79	0.01	8.83	2.11	0.00	0.00	11.74	11.74	11.74	100.00	0.00	0.10	1.75	0.117	14.92	52.6
A	16-54	7.19	5.94	-1.25	22.6	0.64	0.00	1.74	0.60	0.00	0.20	2.98	2.98	3.18	93.70	0.00	0.00	0.15	0.021	6.90	54.2
CA	54-70	5.89	4.85	-1.04	5.0	0.20	0.05	1.75	0.98	0.00	0.30	2.98	2.98	3.28	90.90	0.00	1.41	0.15	0.015	9.67	53.3
C	70-80	5.76	4.77	-0.99	4.6	0.15	0.11	2.39	1.38	0.00	0.20	4.02	4.02	4.22	95.30	0.00	2.51	0.15	0.018	8.06	52.4
R																					

Continue

Horizon	Depth (cm)	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	P _M mg/dm ³	cmol _c /dm ³						%				C/N	P _{REM} mg L ⁻¹	Conclusion			
						K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	ECEC	CEC	V				m	NaS	C
P29 - Yermic Luvisol (Pantoloamic, Epic)/LUVISSOLO CRÓMICO Órtico típico																					
Ap	0-13	6.39	5.58	-0.81	62.4	0.78	0.18	11.82	4.27	0.00	1.30	17.06	17.06	18.36	92.90	0.00	1.00	1.60	0.147	10.89	47.7
AB	13-32	6.08	4.73	-1.35	13.4	0.15	0.28	11.06	3.75	0.00	1.10	15.24	15.24	16.34	93.30	0.00	1.69	0.29	0.041	7.07	46.9
Bt1	32-45	5.20	4.62	-0.58	2.6	0.13	0.53	9.43	3.82	0.00	1.90	13.91	13.91	15.81	88.00	0.00	3.37	0.37	0.041	8.91	43.6
Bt2	45-75	5.94	3.87	-2.07	1.8	0.14	1.22	12.04	6.45	0.19	1.90	19.85	20.04	21.75	91.30	0.90	5.61	0.29	0.034	8.53	43.4
R																					
P30 - Yermic Luvisol (Pantodayic, Epic)/LUVISSOLO CRÓMICO Órtico típico																					
A	0-15	6.37	5.10	-1.27	3.5	0.46	0.34	11.75	9.68	0.00	2.00	22.22	22.22	24.22	91.70	0.00	1.39	0.69	-	-	36.6
Bt	15-35	7.57	6.04	-1.53	2.0	0.04	1.57	15.02	10.76	0.00	0.00	27.39	27.39	27.39	100.00	0.00	5.74	0.38	-	-	33.5
C	35-52+	7.85	6.25	-1.60	3.0	0.03	1.62	14.38	10.38	0.00	0.00	26.42	26.42	26.42	100.00	0.00	6.15	0.38	-	-	38.0
P31 - Yermic Luvisol (Pantodayic, Epic)/LUVISSOLO CRÓMICO Órtico típico																					
A	0-15	7.16	6.02	-1.14	11.4	0.38	0.05	9.88	5.37	0.00	0.80	15.68	15.68	16.48	95.10	0.00	0.28	0.77	-	-	33.9
Bt	15-45	7.44	5.41	-2.03	4.3	0.09	0.39	14.59	9.43	0.00	0.70	24.50	24.50	25.20	97.20	0.00	1.54	0.23	-	-	38.9
R																					
P _M = P extracted by Mehlich-1. H + Al = exchangeable acidity extracted by 1 M KCl. BS = sum of bases. ECEC = equivalent cation exchange capacity. CEC = total cation exchange capacity. V = base saturation. m = aluminum saturation. NaS = Na saturation. P _{REM} = P adsorption capacity of the soil. SOURCE: Elaboration by author (2024).																					

The dominant base in the exchange complex is $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$. Of the twenty-one profiles, only twelve showed base saturation (V) above 50%. The lower base saturation values were registered in the deeper horizons and in toeslopes. On the other hand, these soils had an organic carbon content in the subsurface close to or greater than 1%, and a pH equal to or higher than 5.6. The soils on gnammas (P2 and P4) registered the lowest base saturation and some of the highest CEC values.

The soil profiles presented particle density (PD) values ranging from 2.15 to 2.79 g cm⁻³, and an average of 2.54 g cm⁻³ (Table 6). These results are close to the relative density of quartz (2.5-2.8 g cm⁻³) and feldspar (2.5-2.6 g cm⁻³). The bulk density (BD) values show great variation, ranging between 0.82 and 1.72 g cm⁻³, with an average of 1.24 g cm⁻³. This is probably linked to the differentiation in the textural constitution of the soil horizons sampled. BD values above 1.30 g cm⁻³ suggest sandy horizons, as in most results. BD values below 1.30 g cm⁻³ indicate horizons rich in organic material.

In the surface horizons, the organic C content varied from 0.4 to 19.0% (Table 5). The N content varied between 0.06 and 0.9%. The C/N ratio of these horizons varied from 6.6 to 25.5. The C stock in the surface horizons ranged from 6.14 to 137.56 Mg ha⁻¹ and in the subsurface horizons from 8.43 to 114.88 Mg ha⁻¹ (Table 6), averaging 47.12 and 40.49 Mg ha⁻¹, respectively. The average stocks of N (2.81 Mg ha⁻¹) and bioavailable P (0.027 Mg ha⁻¹) in the surface horizons of the soils in the GIFs also exceed those found for the typical Caatinga context by around 42 and 2 times, respectively.

TABLE 6 - TOTAL STOCKS OF ORGANIC C, TOTAL N AND BIOAVAILABLE P IN SOILS.

Horizon	Depth (cm)	C	N	P**	Particle density	Soil density	Total porosity	Total stocks			
								C	N	P**	
----- g/kg -----											
----- g/cm³ -----											
----- % -----											
----- Mg ha⁻¹ -----											
GIF soils											
P1 - Someric Umbrisol (Pantoloamic, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico típico											
Ah1	0-10	80.16	4.41	0.029	2.38	0.93	61	74.55	4.10	0.027	
2Ah2	10-32	28.30	5.41	0.006	2.56	1.38	46	85.93	16.42	0.018	
P2 - Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Hyperdystric, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico											
Ah1	0-5	189.61	8.68	0.016	2.47	1.02	59	96.70	4.43	0.008	
2Ah2	5-25	53.19	4.08	0.005	2.44	1.08	56	114.88	8.81	0.011	
P3 - Dystric Regosol (Pantoloamic, Humic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico											
A1+A2	0-10*	19.78	1.13	0.028	2.60	1.41	46	27.89	4.43	0.008	
CA	10-25	11.25	0.86	0.012	2.60	1.43	45	24.14	8.81	0.011	
P4 - Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Hyperdystric, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico											
Ah1	0-8	61.83	3.08	0.019	2.41	1.28	47	63.31	3.15	0.019	
P5 - Dystric Regosol (Pantoloamic, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico											
A+2Ab	0-18*	24.48	1.64	0.057	2.63	1.72	35	75.78	5.08	0.176	
P6 - Cambic Someric Umbrisol (Pantoloamic, Humic, Panpaic)/CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico típico											
Ah	0-8	20.01	1.64	0.026	2.60	1.50	42	24.01	1.97	0.031	
P8 - Eutric Regosol (Epiarenic, Katoloamic, Humic, Panpaic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico léptico éutrico											
Ah	0-5	10.67	0.62	0.024	2.62	1.15	56	6.14	0.36	0.014	
2Ahb1	5-25	30.57	1.61	0.012	2.52	1.09	57	66.64	3.51	0.026	

Continue

Horizon	Depth (cm)	C	N	P**	Particle density	Soil density	Total porosity	C	N	P**	Total stocks
		----- g/kg -----			----- g/cm³ -----	-----	----- % -----	-----	----- Mg ha⁻¹ -----		
P9 - Someric Umbrisol (Epiloamic, Katoarenic, Eutric, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico fragmentário											
Ah1	0-5	84.04	3.30	0.031	2.25	0.82	64	34.46	1.35	0.013	
2Ah2	5-35	12.24	0.68	0.022	2.62	1.36	48	49.93	2.77	0.090	
P10 - Dystric Regosol (Pantoloamic, Ochric)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico saprolítico											
Ah	0-8	30.57	1.63	0.017	2.60	1.27	51	31.06	1.66	0.017	
AC	8-30	9.16	0.62	0.004	2.56	1.08	58	21.77	1.47	0.010	
P11 - Eutric Regosol (Pantoloamic, Ochric)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico leptofragmentário											
Ah	0-8	22.91	1.72	0.010	2.62	1.35	48	24.74	1.86	0.011	
AC	8-35	7.66	0.65	0.002	2.65	1.24	53	25.63	2.18	0.007	
P12 - Dystric Cambisol (Pantoloamic, Raptic)/CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico típico											
Ah1	0-5	43.91	2.25	0.011	2.27	0.87	61	19.10	0.98	0.005	
Ah2	5-40	19.08	1.41	0.003	2.50	0.90	64	60.11	4.44	0.009	
P13 - Eutric Regosol (Loamic, Amphiarenic, Humic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico											
Ah	0-15	34.39	2.11	0.018	2.51	1.14	55	58.82	3.61	0.031	
AC	15-40	11.48	0.65	0.004	2.47	1.01	59	29.00	1.64	0.010	
P14 - Haplic Phaeozem (Pantoloamic, Humic, Raptic)/NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico fragmentário											
Ah1	0-8	61.13	0.30	0.017	2.51	1.22	51	59.67	0.29	0.017	
2Ah2	8-20	18.33	1.13	0.017	2.62	1.08	59	23.75	1.46	0.022	
P16 - Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Raptic, Endogleyic)/GLEISSOLO MELÂNICO Tb Distrófico plintossólico											
Ah1	0-5	53.88	0.42	0.018	2.15	0.99	54	26.67	0.21	0.009	

Continue

Horizon	Depth (cm)	C			N			P**	Particle density g/cm³	Soil density	Total porosity		Total stocks		
														C	N
		----- g/kg -----			----- g/cm³ -----						----- % -----		----- Mg ha ⁻¹ -----		
2Ah2	5-25	8.76	0.08	0.006	2.67	1.39	48	24.35	0.22	0.017					
2A3	25-60	5.10	0.05	0.007	2.79	1.63	42	29.12	0.29	0.040					
2AC	60-94	1.45	0.05	0.014	2.78	1.71	39	8.43	0.29	0.081					
P17 - Haplic Phaeozem (Epiloamic, Panpaic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico saprolítico															
Ah	0-3	27.72	1.72	0.032	2.50	1.27	49	17.61	1.09	0.020					
2Ahb	3-20	11.54	0.77	0.005	2.56	1.43	44	24.76	1.65	0.011					
P18 - Haplic Phaeozem (Pantoloamic, Panpaic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico															
Ah1	0-10	52.78	3.30	0.010	2.41	1.04	57	54.89	3.43	0.010					
Ah2	10-20	13.98	0.93	0.004	2.56	1.35	47	18.87	1.26	0.005					
P19 - Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Eutric)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico															
Ah+A	0-25*	43.33	2.35	0.021	2.50	1.27	49	137.56	7.46	0.067					
P21 - Eutric Leptosol (Loamic)/NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico															
Ap	0-20	5.34	0.62	0.019	2.69	1.42	47	15.15	1.76	0.054					
Mean (n of horizons)															
	Surface (18)	48.14	2.27	0.02	2.48	1.20	51.78	47.12	2.62	0.030					
	Subsurface (15)	16.14	1.27	0.01	2.59	1.28	51.00	40.49	3.68	0.025					
	All (33)	33.59	1.82	0.02	2.53	1.24	51.42	44.10	3.10	0.027					
CV %	Surface (18)	86.86	85.57	49.10	5.99	19.44	14.20	71.75	74.99	134.01					
	Subsurface (15)	80.13	118.84	71.44	3.87	18.25	14.64	72.73	120.95	107.42					
	All (33)	105.82	99.46	71.72	5.47	18.82	14.19	71.62	106.91	124.20					
Typical Caatinga soils															

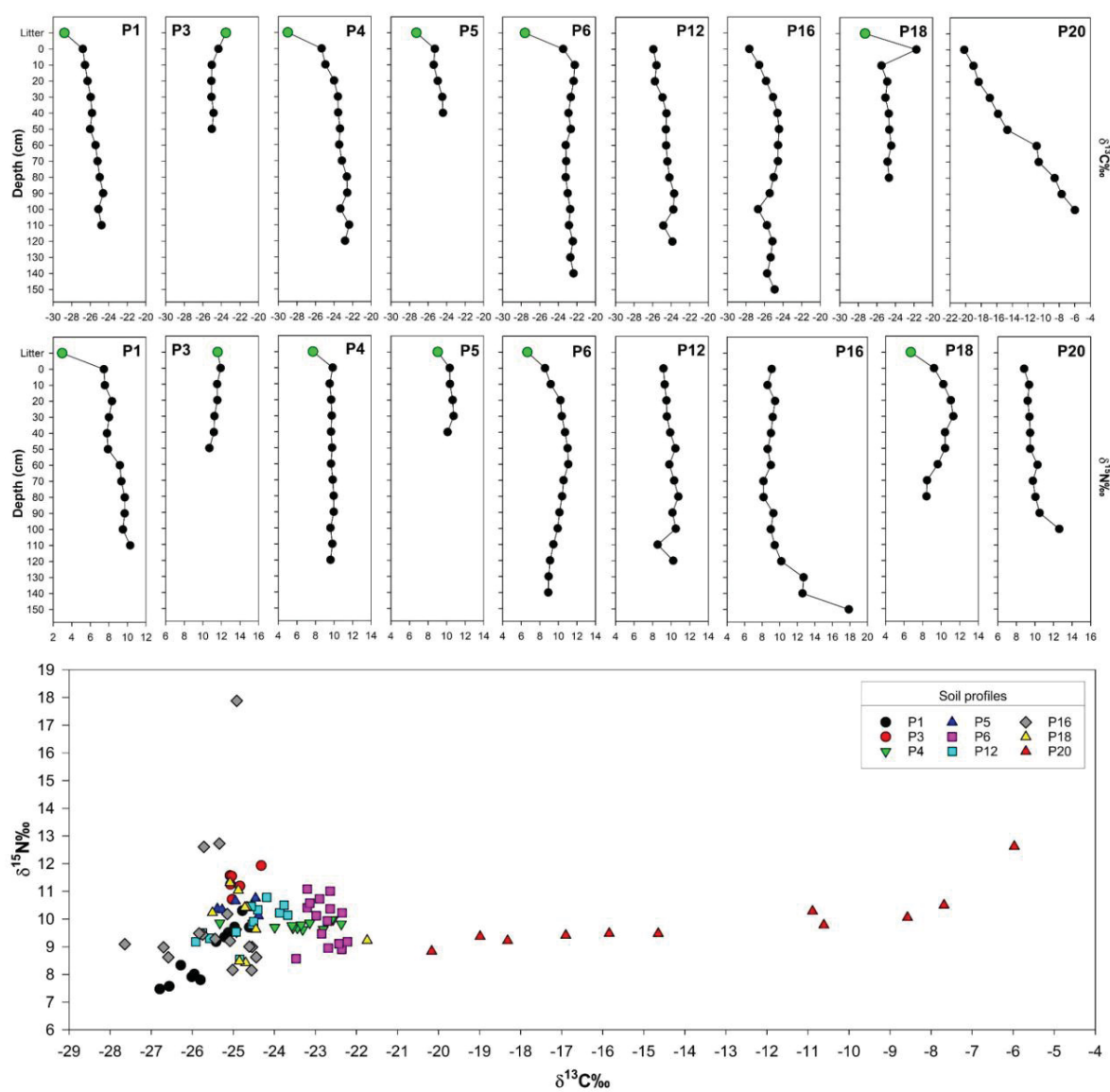
Continue

Horizon	Depth (cm)	C	N	P**	Particle density	Soil density	Total porosity		Total stocks	
							g/kg	g/cm³	%	C
----- g/kg ----- g/cm³ ----- % ----- Mg ha ⁻¹ -----										
P23 - Yermic Vertic Luvisol (Epiloamic, Clayic, Hypereutric, Epic)/LUVISSOLO CRÔMICO Órtico vertissólico										
A	0-10	11.48	0.05	0.010	2.64	1.34	49	15.39	0.07	0.013
P25 - Yermic Leptic Luvisol (Epiclayic, Epiloamic, Epic/ LUVISSOLO HÁPLICO Órtico típico										
BA	0-10	3.07	0.40	0.002	2.71	1.42	48	4.37	0.57	0.002
Bt	10-30	3.07	0.30	0.014	2.72	1.66	39	10.21	1.00	0.046
P26 - Yermic Vertic Luvisol (Pantoloamic, Epic)/LUVISSOLO CRÔMICO Órtico vertissólico										
A	0-5	8.60	0.80	0.008	2.67	1.68	37	7.22	0.67	0.007
AB	5-20	3.90	0.50	0.001	2.78	1.43	49	8.37	1.07	0.002
P27 - Yermic Luvisol (Pantoloamic, Epic)/LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico										
A	0-10	15.60	1.1	0.023	2.67	1.58	41	24.65	1.74	0.037
Bt	10-30	3.90	0.4	0.001	2.60	1.63	37	12.71	1.30	0.004
P28 - Eutric Regosol (Epiloamic, Amphiarenic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico léptico										
Ap	0-16	17.46	1.17	0.356	2.70	1.60	41	44.69	3.00	0.911
A	16-54	1.45	0.21	0.023	2.70	1.61	40	8.87	1.28	0.138
CA	54-70	1.45	0.15	0.005	2.78	1.65	42	3.83	0.40	0.013
C	70-80	1.45	0.18	0.005	2.67	1.47	45	2.13	0.26	0.007
P29 - Yermic Luvisol (Pantoloamic, Epic) /LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico										
Ap	0-13	16.01	1.47	0.062	2.56	1.45	43	30.18	2.77	0.118
AB	13-32	2.90	0.41	0.013	2.78	1.75	37	9.64	1.36	0.045
Bt1	32-45	3.65	0.41	0.003	2.74	1.60	42	7.60	0.85	0.005
Continue										

Soil properties and phosphorus dynamics										Conclusion
Horizon	Depth (cm)	C	N	P**	Particle density	Soil density	Total porosity	Total stocks		
		g/kg	g/kg		g/cm³		%	C	N	P**
Bt2	45-75	2.90	0.34	0.002	2.82	1.78	37	15.49	1.82	0.010
Mean (n of horizons)	Surface (6)	12.04	0.83	0.08	2.66	1.51	43.17	21.08	1.47	0.181
	Subsurface (9)	2.74	0.32	0.01	2.73	1.62	40.89	8.76	1.04	0.030
	All (15)	6.46	0.53	0.04	2.70	1.58	41.80	13.69	1.21	0.091
CV %	Surface (6)	45.57	63.45	180.21	2.04	8.50	10.61	72.14	83.39	198.55
	Subsurface (9)	37.98	37.43	101.88	2.49	7.04	10.04	46.63	46.87	146.48
	All (15)	89.72	79.42	255.96	2.64	8.11	10.28	83.67	70.08	254.98
Comparison data										
Lithic soils (n = 188)		2.40-19.80	0.30-1.50	-	-	-	-	25.80	2.50	-
	India (n = 15)	20.00-40.00	6.00-10.00		-	-	-	-	-	-
Mexico (n = 9,549)		5.0-20.0	-	-	-	-	-	-	-	-
Spain (n = 180)		2.7-31.1	0.20-3.06	-	-	1.03-1.60		5.25-11.04	0.36-1.07	-
Algeria (n = 180)		0.30-31.20	-	-	-	-	-	0.09-41.84	-	-
Ethiopia (n = 20)		2.96-25.4	0.31-2.24	-	-	1.28-1.56	-	2.28-16.1	0.24-1.42	-
Legend: *Added horizons. **Bioavailable phosphorus extracted by Mehlich-1. Comparison data = minimum - maximum; Lithic soils = Dry ecosystems in Brazil (Oliveira Filho <i>et al.</i> , 2024); India = semiarid region of Rajasthan (Yadav <i>et al.</i> , 2008); Mexico = Semiarid soils in Mexico (Krasilnikov <i>et al.</i> , 2013); Spain = Mediterranean region in southeastern Spain (Benslama <i>et al.</i> , 2024); Algeria = arid and semiarid regions of northeastern Algeria (Chenchouni; Neffar, 2022); Ethiopia = Semiarid river basin in Tigray, northern Ethiopia (Gelaw; Singh; Lal, 2014).										
SOURCE: Elaboration by author (2024).										

The variation in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of soil organic compounds was less than 4 ‰ between the horizons of each profile, except for the Haplic Umbrisol (P16) and Salic Vertisol (P20). With the exception of Salic Vertisol, the soils record humid environmental conditions throughout their genesis despite the dominant semiarid climatic condition. In turn, the Hydromorphic Vertisol records C associated with algae between the base and 60 cm depth, transitioning to the domain of C_4 plants (Figure 18).

FIGURE 18 - SCATTERPLOT OF $\delta^{13}\text{C}$ AND $\delta^{15}\text{N}$ VALUES. GREEN DOTS REPRESENT LITTER SAMPLES. BLACK DOTS REPRESENT SOIL SAMPLES.



SOURCE: Elaboration by author (2024).

5.1.4.2 Typical soils in Caatinga

The soils from the typical Caatinga context were identified as Luvisols (six soil profiles), Regosols (three), and Cambisols (one). Generally, soils are shallow, except for soil developed on terraces and derived from river sediments. The predominant color for most horizons is brownish. We observed blocks of simple, strong to moderate, subangular, and prismatic types. The consistency is predominantly friable, slightly plastic, and slightly sticky. Roots are absent, few, or common. The pores are small and range from few to common. The superposition of A horizons over B or C horizons represents typical Caatinga soils.

The texture varies from sandy clay loam to sandy loam. Coarse sand is the main fraction of soils and represents 34.7%. These soils have reactions that vary from neutral to alkaline. The Al^{3+} content is practically absent, and the potential acidity ($\text{H}+\text{Al} = 0.96$) is lower than in GIF soils. Typical Caatinga soils are predominantly eutrophic, where base saturation exceeds 71% in all profile horizons. High P_{REM} contents (average of 45.4 mg L^{-1}) indicate low P retention capacity (Table 5). In general, soils from the Caatinga have lower average C, N, and C/N values in the order of 418%, 330%, and 30% than soils from GIF, respectively.

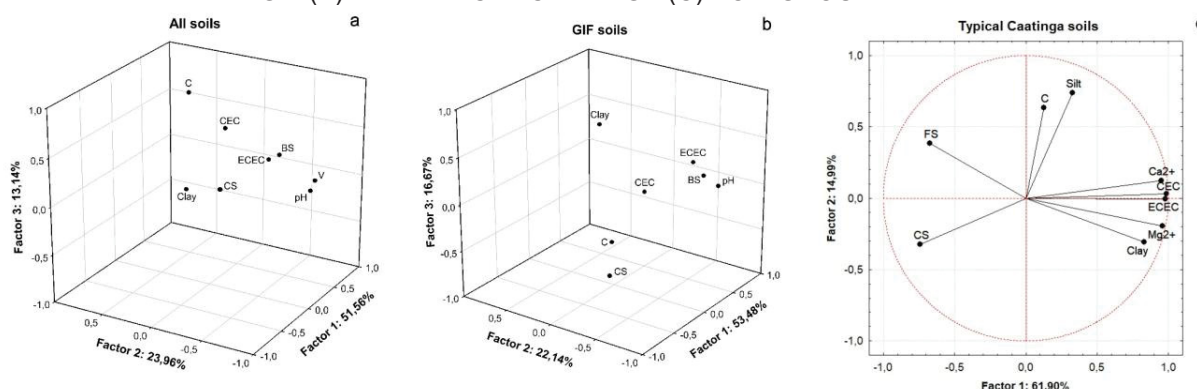
5.1.4.3 PCA analysis

Three principal components (PCs) explained approximately 88.66% of the variance considering all sampled soil profiles (Figure 19a). PCs with high eigenvalues better represent the variability of data characteristics. Components 4 and higher had eigenvalues below 1.0 and hardly explained more variance than any original variables (1/8, 12.5%), so they were excluded from subsequent analyses (Hilton, 2014).

The original variables linked to the first three main components mainly express the weathering stage and the difference in the parent material of the soils. The first component (PC1) explained 51.56% of the total data variance and comprised ECEC, BS, CEC, and coarse sand content (CS). The second component (PC2) explained 23.96% of the total variation, composed of pH, V, and clay content. The third main component (PC3) accounts

for 13.14% of the total variation. The organic C content composes the PC3. PC1 reveals the antagonism between ECEC, BS, CEC, and coarse sand content. PC2 shows the antagonism between the content of pH, V, and clay content. PCAs were also performed to find the PCs of the soil groups in GIF and in the typical Caatinga.

FIGURE 19 - PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS CONSIDERING THE ENTIRE SAMPLE SET (A) AND THE GIF (B) AND TYPICAL CAATINGA (C) SOIL GROUPS SEPARATELY.



SOURCE: Elaboration by author (2024).

For the GIF soils, three PCs recorded an eigenvalue above one and an explanatory power of 92.28% of the total data variation (Figure 19b). PC1 explained 53.48% of the data variance and comprises ECEC, BS, CEC, and coarse sand content. PC2 and PC3 together explained 38.81% of the data variation and are mainly composed of pH, clay (PC2), and C (PC3), respectively. In the case of typical Caatinga soils, two PCs recorded eigenvalues above one, explaining around 76.90% of the total data variation (Figure 19c). In this group, the first principal component (PC1) explains 61.90% of the total variation. The CEC, ECEC, Mg^{2+} , Ca^{2+} , clay, CS, and fine sand (FS) are correlated to PC1. PC2 accounts for 14.99% of the total variation in this group and is mainly formed by silt and C contents.

5.1.5 Discussion

The diversity of properties related to base concentration, texture, and organic C content reflects the diversity of source materials and weathering conditions in different landscape contexts in the Brazilian semiarid region. The PCA performed between original

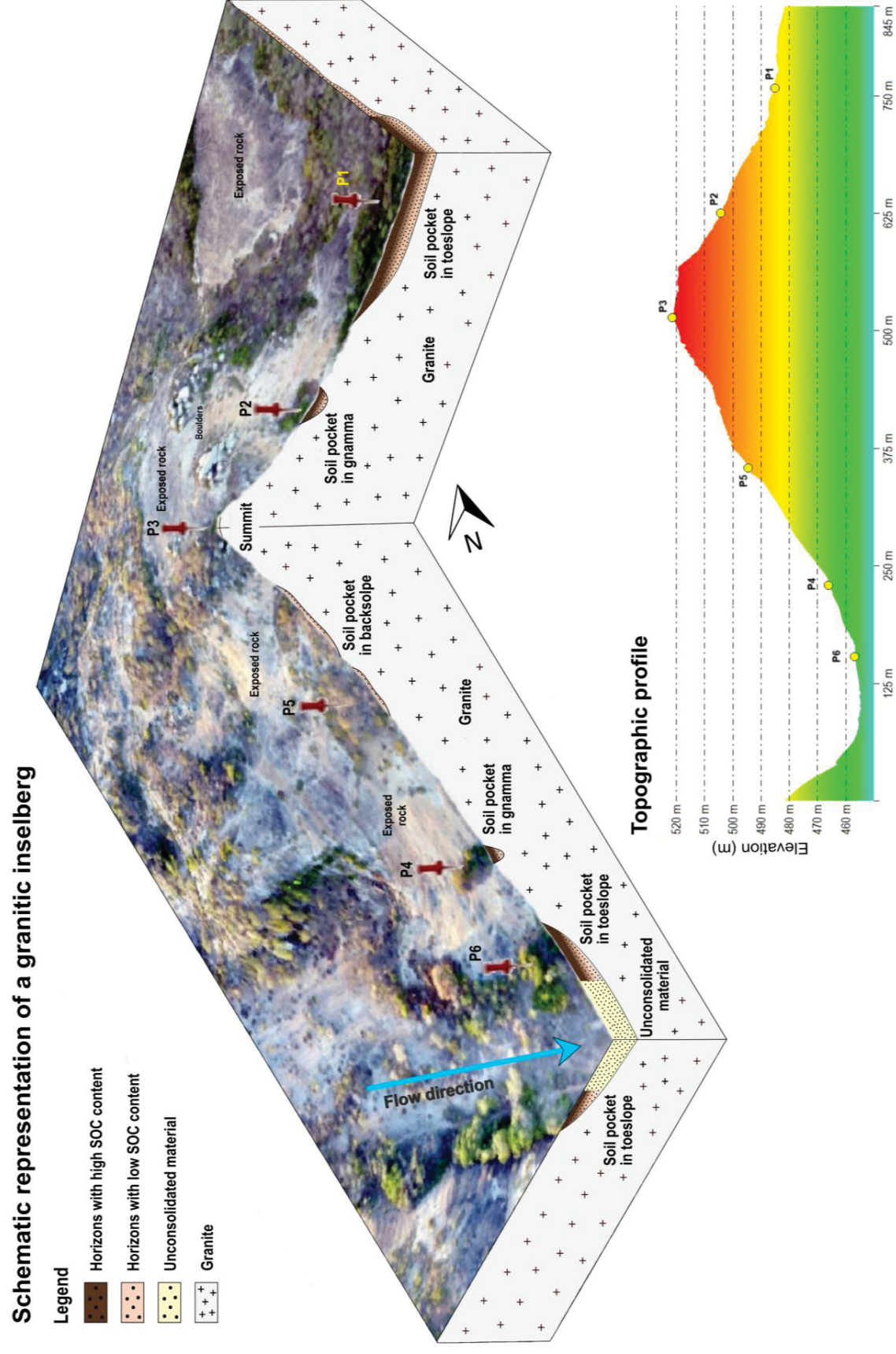
variables considering all groups (Figure 19a) suggests differences in the genesis between GIF soils and typical Caatinga soils. The GIF soils have higher sand content, are more acidic and dystrophic, and consequently more weathered than those observed in the Caatinga. Textural ratios indicate that the GIF soils are formed of autochthonous and allochthonous material from the granite (Figures 20, 21 and APÊNDICE D). On the other hand, high base saturation, high activity clays, and low levels of organic C are commonly found in typical Caatinga soils (Tables 5 and 6).

In the case of the soils in the GIF. The occurrence of acidic and low base saturation soils in GIF is attributed to their vegetation cover. Granite bodies intruded during the Brazilian orogenesis (650-620 M.a.) in the Borborema Geological Province (do Nascimento *et al.*, 2015; Salgado *et al.*, 2015) support residual reliefs (Corrêa *et al.*, 2010) such as inselbergs (Maia; Nascimento, 2018) higher than the surrounding areas.

During the exhumation process, granite bodies normally undergo pressure relief that conditions the preferential paths of fracture networks or faults. Once exposed, the rocks are subject to adverse weather conditions (Xavier, 2021) and attack by weathering agents (Lopez; Bacilio, 2020). In addition to suffering from physical-chemical changes, gnammas and fractures accumulate water, sediments, nutrients, and biogenic residues. The accumulation of these materials enables the development of soil with favorable conditions for plant colonization (Burke, 2002; Clark-Ioannou *et al.*, 2021; Pérez, 2023).

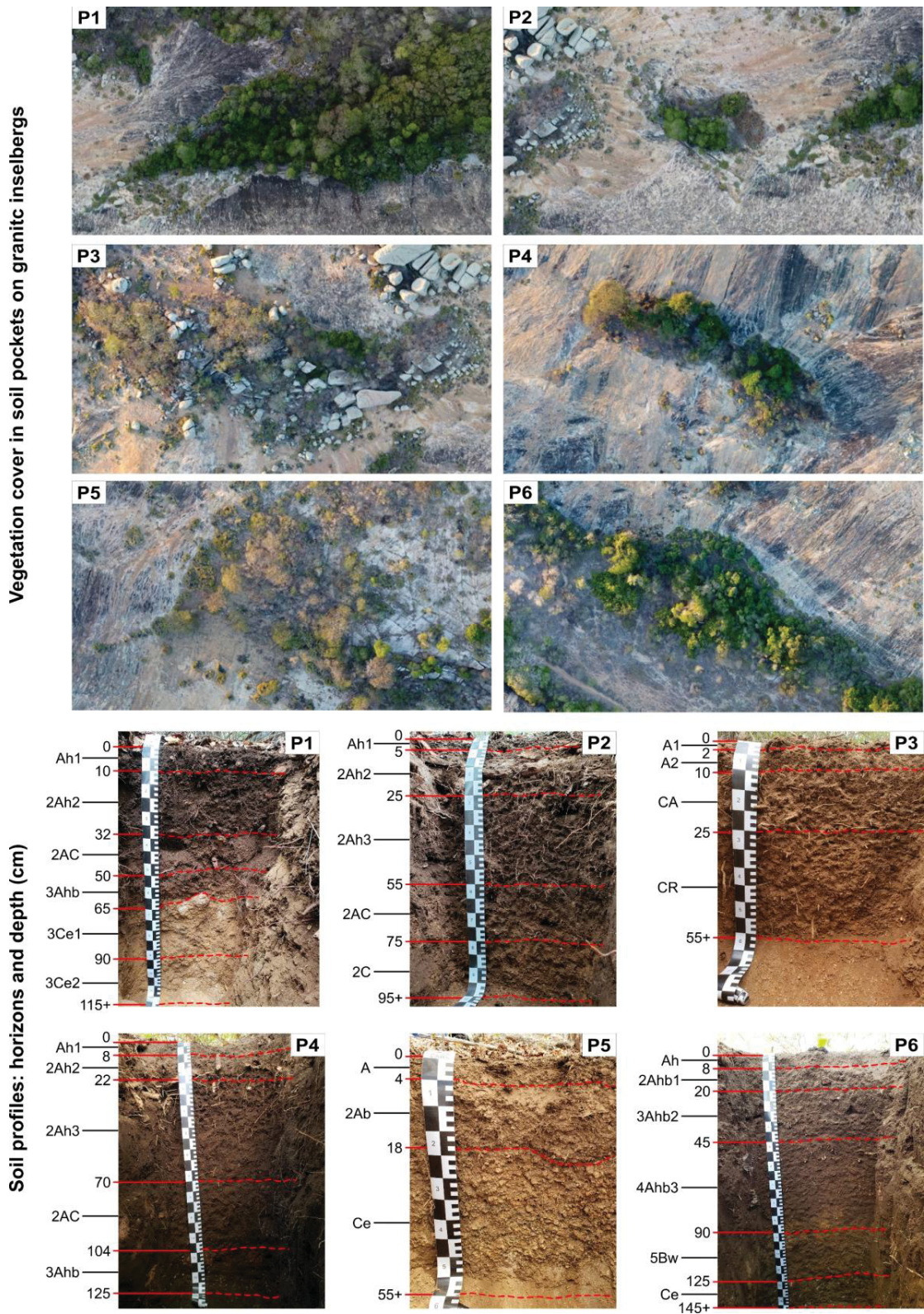
As soils are deeper and water availability increases (Ottaviani *et al.*, 2016; Schut *et al.*, 2014; Yates *et al.*, 2019), denser, more diverse, and larger plant communities are observed, even allowing the occurrence of species sensitive to water scarcity native to other biomes in Brazil, such as the Amazon, Cerrado and Atlantic Forest (Lunguinho, 2018; Salvador *et al.*, 2023). Species such as *Bixa orellana*, *Chloroleucon tortum*, *Erythroxylum suberosum*, *Hymenaea rubriflora*, *Myrcia neolucida*, *Myroxylon peruiferum*, *Pisonia ambigua*, *Plinia grandifolia* and *Vitex orinocensis* (APÊNDICE B), observed exceptionally in the various “soil pockets” (Burke, 2002) of the granite inselbergs, which allow for a greater contribution of organic matter, causing these soils to have average organic C levels around five times higher than those observed in the typical Caatinga (Table 6).

FIGURE 20 - SCHEMATIC MODEL OF SOIL GENESIS IN THE GRANITIC INSELBERG.



SOURCE: Elaboration by author (2024).

FIGURE 21 – VEGETATION COVER AND SOIL PROFILE IN GRANITIC INSELBERG FIELDS.



SOURCE: Elaboration by author (2024).

The greater supply of organic matter favors the occurrence of darker colors in the surface horizons (Souza *et al.*, 2023). These soils also presented a subangular structure, an abundance of very fine and fine roots, and dominance of pores ranging from small to large, tubular type and, to a lesser extent dendritic type, indicating widespread bioturbation (Freitas *et al.*, 2021; Schellekens *et al.*, 2023).

Soils high base saturation and high pH eventually are registered in the surface horizon and in the highest positions of the slopes. With the exception of the profiles classified as Vertisol, the profiles in toeslope and the pediment surface, P7, P8, P11, P14, P15, P17, P18 and P21, are less acidic, with an average pH of 5.85, a mean base saturation at about 71%, and have the lowest C and N contents of the soils in the GIF, averaging 1.49% and 0.11%, respectively. In addition, the P_{REM} of these profiles is very high, averaging around 46.21 mg L⁻¹. The high values indicates organic and mineral compounds of low affinity with P. As is the case for typical Caatinga soils, these eutrophic profiles of the GIF probably have a lower capacity to retain moisture, and the little that is retained remains in the system for a shorter period. The reduction in moisture tends to slow down weathering processes, leading to soils presenting characteristics similar to those observed in the parent material.

The organic compounds play an essential role in water retention (Lal, 2020), and, consequently, its availability to plants, especially for soils in arid and semiarid regions (Stewart; Lal, 2018). An average increase of 1% in SOM content, for a surface layer of 10 cm, favors an increase in water available to plants by 3 mm for sandy soils, 2.5 mm for loam soils, and 2 mm for clayey soils, and reduces the permanent wilting point compared to field capacity (Murphy, 2015). For sandy soils, specifically, with SOM contents ranging from 0.5-1.0, 1.0-3.0, and >3%, at a depth of 0-20 cm, a 1% increase in SOM content increases water content available to plants in the range of 3-4, 2-3 and 1 mm, respectively (Wosten *et al.*, 2019).

The occurrence of plant species sensitive to water scarcity in GIF soils is attributed to the greater availability of water favored by plants due to the increase in SOM content (Hudson, 2014; Minasny; McBratney, 2018; Rabot *et al.*, 2018; Rawls *et al.*, 2003). SOM can store up to 20 times its mass in water (Stevenson, 1994) and serve as a binding agent for sand particles, creating more stable and porous aggregates (Silva *et al.*, 2023).

Furthermore, the dominance of sandy loam texture reduces water loss through capillarity-evaporation from the soil surface (Li *et al.*, 2014).

Low base saturation soils occur only in the context of the GIF, accounting for 57% of the 21 profiles (Table 5). Low and high base saturation soils are irregularly distributed across the GIF landscape (Table 2). However, low base saturation soils seem more associated with gnammas and toeslopes. High acidity levels are derived from partial decomposition of organic compounds (Conforti *et al.*, 2020, 2016). The decomposition of soil organic matter releases functional acids, such as phenolic and carboxylic acids, which dissociate and generate H^+ ions (Silva, 2023). The high specific surface area ($800\text{-}900\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$) and low zero charge point ($200\text{-}300\text{ cmol}_c\text{kg}^{-1}$) of organic compounds accelerate the leaching of bases (Grohmann, 1972; Pennell *et al.*, 1995). With an increase in the concentration of H^+ in the solution, the pH reduces and consequently increases the soil's acidity. Under acidic conditions, basic cations are more easily leached due to the affinity between the H^+ ion and the clay surface.

The decrease in ECEC and the formation of soluble complexes with inorganic anions and organic acids also reduces the activity of bases in the soil. Furthermore, the predominance of sandy loam tends to favor increased infiltration and percolation of rainwater along the profiles, thus intensifying the leaching of basic cations (Table 4). High levels of acidity and dystrophy are frequently reported for highly weathered soils in tropical environments with high average annual rainfall, such as the Atlantic Forest – 1.500 mm (Pacheco *et al.*, 2018) and the Amazon – 2.500 mm (Fonseca *et al.*, 2021).

The soils in gnammas and toeslopes (P1, P2, and P4) have an average base saturation close to 12%, the lowest base saturation in this study. A higher CEC in relation to ECEC suggests deep nutrient leaching. Soils developed in gnammas (P2 and P4) are more likely to maintain moisture for longer periods, allowing for the intensification of weathering (Figures 20 and 21). P1, on the toeslope of the inselberg, has similar characteristics, however, it is less dystrophic than the soils in the gnammas.

Other chemical properties, such as the low ΔpH and the low P_{REM} in profiles located in gnammas and at the toeslope of inselbergs suggest an unusually advanced stage of weathering and pedogenesis, in comparison to typical Caatinga soils (Tables 2 and 5). The similar isotopic signatures of soil and litter suggest that the source of organic C was

maintained throughout the pedogenetic process (Figure 18). Therefore, we suggest two possible hypotheses regarding the genesis of soils in GIF: a) these soils were formed in the past, in wetter climates; or b) these soils were formed in the current climate, but the geomorphological condition has always favored greater accumulation and maintenance of moisture.

The analytical results of the physicochemical properties suggest accentuated weathering in humid conditions. Palynological records close to GIF (<30 km away) reveal that the semiarid climate has been in effect for around 4.900 years (Souza *et al.*, 2023). The soil pockets located in gnammas or around granitic inselbergs (toeslope) present hydrological conditions, in addition to unusual levels of organic C, different from those observed for typical soils of the Caatinga, and therefore maintained pedogenetic processes such as melanization, leaching, and gleization, which are characteristic of humid environments.

Considering the recent implementation of the semiarid climate, such pedogenetic processes would not have their origin in the current climatic context. In more humid phases, several periods of the late Pleistocene and early Holocene enabled the advancement and consequent connection between the Amazon Forest and the Atlantic Forest, occupying the current semiarid region, allowing for higher organic C accumulation, formation of more weathered and developed soils, in addition to intense floristic exchange (Ab'sáber, 1992; Arruda *et al.*, 2015; Souza *et al.*, 2022).

As the climate became drier, the Caatinga expanded. In this scenario, areas suitable for maintaining past characteristics were fragmented as climatic, botanical, and pedological inheritances, mainly associated with higher areas (Barbosa *et al.*, 2015; Bétard, 2012; Souza *et al.*, 2022) or in conditions of presence of soil pockets provided by the existence of inselbergs/rocky outcrops (Salvador *et al.*, 2023). This change to a drier climate, in general, tends to minimize these paleoenvironmental characteristics in the Caatinga, as in more typical landscapes, the soils naturally have a lower capacity to store water and organic C due to the reduction in precipitation and change in vegetable cover.

The imposition of a semiarid climate will pedogenetically nullify the possibilities of maintaining a dense, larger vegetation cover sensitive to water scarcity, leading to an adjustment of soils to the current semiarid climate. The different morphologies in the GIF

probably acted and still act as a refuge for soils and biodiversity, which resisted past climate changes.

The second hypothesis is based on the geomorphological diversity provided by the granitic inselbergs field (GIF). The granitic inselbergs appear abruptly amidst the flat landscapes of the typical Caatinga. The rocky slopes of inselbergs govern the distribution of water, sediments and organic residues, which in turn tend to accumulate in the lower areas of the relief, such as gnammas, cracks/fractures, and toeslope (Burke, 2002; Meyer *et al.*, 2021; Pérez, 2023). In this way, plant species that are more demanding on water can colonize and develop (Salvador *et al.*, 2023).

In these places, denser, diverse, and larger vegetative fragments are observed, which generally favors greater primary production of organic matter and consequent deposition in the soil (Ottaviani *et al.*, 2016). Greater primary production promotes greater incorporation of organic residues into the soil than typical Caatinga soils (de Souza *et al.*, 2022). The increase in humidity provided by these soil pockets also contributes to increasing organic C levels in the soil.

The existence of larger forest fragments produces greater shading and reduces the amplitude of the daily thermal oscillation (Lunguinho, 2018). In this scenario, true “microclimate islands” form and mitigate the extreme conditions observed on exposed rock surfaces, enhancing biological activity (Bramer *et al.*, 2018; Gillingham *et al.*, 2012; Schut *et al.*, 2014; Yates *et al.*, 2019). The seasonality of rainfall in the semiarid region, associated with higher humidity levels, organic C, and intense biological activity, can periodically intensify soil acidification by releasing more H^+ ions from organic compounds and consequent leaching of basic cations. The reduction of exchangeable bases leads to dystrophy, suggesting an advanced weathering stage in these soils.

The higher levels and stocks of organic C in GIF soils can also be attributed to the higher C/N ratio (Table 5), which limits the decomposition of organic compounds (Silva *et al.*, 2023). The higher C/N ratio and low soil density in these superficial horizons indicate the accumulation of light organic compounds from poorly decomposed plant residues (Bernardi *et al.*, 2023), assuming that the residue accumulation process organics is recent (Tadini *et al.*, 2018). A virtual decrease in the C/N ratio and simultaneous stabilization of organic compounds are frequently observed in the literature (Grüneberg *et al.*, 2014; Pires

et al., 2017). Furthermore, positive correlations between C/N and organic C observed in the literature suggest that the increase in organic C stock occurs in conditions less favorable to microbial activity (Chen *et al.*, 2019; Grand; Lavkulich, 2012).

The typical context of the Caatinga is characterized by gneisses and schists that are less resistant to weathering compared to granite (Maia *et al.*, 2015), which correspond to wide, smooth hills and flattened surfaces (Xavier, 2021) (Figure 16) with a predominance of vegetation cover shrub (Souza *et al.*, 2015; Souza; Souza, 2016). In theory, they should allow the formation of deeper, better-structured soils and higher water infiltration rates (de Souza *et al.*, 2022) than those observed in the GIF. However, the combination of scarce vegetation cover, with areas in an advanced stage of desertification (Ballén *et al.*, 2016; Souza *et al.*, 2015) and soil erosion rates of up to 51 t ha⁻¹ year⁻¹ (Albuquerque *et al.*, 2001), tends to selectively remove organic and mineral particles (Borges Neto *et al.*, 2023), restricting the formation of thicker A horizons and even organic horizons.

Another process to be considered is the photodegradation of SOM in typical Caatinga soils. This is particularly important for our study region, which receives around 2.800 hours of sunshine annually (Nascimento *et al.*, 2014). The high incidence of insolation associated with high exposure to UV radiation can cause a reduction of up to 60% in the litter mass (Austin; Vivanco, 2006; Hussain *et al.*, 2023).

This process occurs through the photochemical mineralization of lignin exposed to UV radiation, which produces smaller organic compounds, accelerating SOM decomposition (Esch *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2021; Yao *et al.*, 2022). The exchange between solar radiation and water pulses can also lead to biological oxidation and C leaching, further impacting soil organic composition and nutrient cycling (Austin; Vivanco, 2006; Esch *et al.*, 2019; Noy-Meir, 1973). Thus, photodegradation helps to reduce SOM contents, and, consequently, restricts the melanization of the horizons of typical Caatinga soils, as observed in the predominance of brownish color (Table 3).

Although the organic compounds of the Caatinga are more restricted and do not play such an essential role in the complexation of bases and the generation of negative charges, due to the abundance of permanent charges on the surface of the clays, the organic compounds will serve as a source of C, N and P, chemical elements that have a

high affinity with biological activity and are demanded in high concentrations by plants and microorganisms (Menezes *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2023). Furthermore, SOM in the Caatinga is important for improving physical properties, such as the stability of aggregates and greater water retention capacity, especially during dry periods, common to the current semiaridity (Lal, 2020; Oliveira Filho *et al.*, 2024, 2022a, 2022b).

5.1.5.1 C, N, and P in dry forests

Due to droughts, dry forests in arid and semiarid regions have a lower capacity to sequester C per unit area (López-Fando; Pardo, 2011). Furthermore, these regions are characterized by thinner vegetation cover (low primary production) compared to wetter ecosystems, and consequently, they have lower levels of organic C in their soils (Lal, 2019; Oliveira Filho *et al.*, 2022b; Plaza *et al.*, 2018; Queiroz *et al.*, 2018). However, our results show that GIF soils had median organic C values that exceeded values previously observed in other semiarid environments by 10.2 times – India (Yadav *et al.*, 2008), 3.2 times – Ethiopia (Gelaw *et al.*, 2014) and Brazil (Oliveira Filho *et al.*, 2024), 2.7 times – Spain (Benslama *et al.*, 2024), 2.3 times – Mexico (Krasilnikov *et al.*, 2013) and 1.8 times – Algeria (Chenchouni; Neffar, 2022) (Table 6).

Organic C is the main component of SOM, representing 58% of its mass (Tormena *et al.*, 2023). C improves soil structure and increases its capacity to retain water (Minasny; McBratney, 2018), especially in environments with reduced precipitation (Lal, 2019; Oliveira Filho *et al.*, 2022b). Furthermore, SOM releases N and P to plants throughout the decomposition processes, serving as a primary reservoir of such nutrients. N acts in the production of proteins and chlorophyll in plants; however, in semiarid conditions, its occurrence is mitigated due to low C levels in soils and evaporation at high temperatures (Skujinš, 1981). Given this, the biological fixation of N by plants, especially legumes, may be a mechanism to compensate for its absence (Freitas *et al.*, 2015). On the other hand, P helps transfer energy within plants and synthesize nucleic acids, although its availability is reduced in acidic soils (Oliveira Filho *et al.*, 2022a).

In summary, the relationship/interaction between C, N, and P, boosted by the decomposition of SOM, not only makes N and P available but also regulates the

biogeochemical cycles of N and P (Menezes *et al.*, 2012). The availability of these elements in soils is essential to sustain ecosystems and promote carbon sequestration and nutrient cycling (Lourenço *et al.*, 2022; Menezes *et al.*, 2012; Tang *et al.*, 2022).

5.1.6 Conclusions

Pedogenetic processes typical of humid tropical conditions occur in areas influenced by granitic inselbergs, despite the surrounding semiarid context. The occurrence of acidic, dystrophic soils with a high organic carbon content appears to be directly related to the local geomorphological arrangement. The morphology of rocky slopes favors the accumulation of water, sediments, and organic compounds in soil pockets, inducing pedogenesis of more developed soils. In these environments, species sensitive to water scarcity and native to wetter biomes occur, providing a refuge for biodiversity in the Brazilian Northeast. Further research could increase the understanding of paleoenvironmental evolution in the Caatinga domains, the estimation of the richness of this biome, and the C, N, and P stocks of soils in the Caatinga, helping to reduce uncertainty in relation to the great disparity and scarcity of data available in the literature.

Our findings could also lead to the development of innovative land conservation and restoration actions with low opportunity costs to mitigate climate change in dryland biomes, combat desertification, and support the maintenance of biodiversity and ecosystem services that sustain the environment of human subsistence.

5.1.7 References

AB'SÁBER, A. N. A teoria dos refúgios: origem e significado. **Revista do Instituto florestal**, v. 4, n. 1, p. 29-34, 1992.

ALBUQUERQUE, A. W.; LOMBARDI NETO, F.; SRINIVASAN, V. S. Effects of native semiarid vegetation deforestation on soil and water losses of a haplalgids in Sumé, Paraíba, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 121-128, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000100013>.

ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 27-32, 2000.

ANTHELME, F.; MATO, M. W.; MALEY, J. Elevação e refúgios locais asseguram persistência da vegetação específica de montanha no Saara nigeriano. **Journal of Arid Environments**, v. 72, n. 12, p. 2232-2242, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.07.003>.

ARAÚJO FILHO, J. C.; CORREA, M. M.; PAIVA, A. Q.; COSTA, O. V.; VALLADARES, G. S.; RIBEIRO, M. R.; SCHAEFER, C. E. G. R. Semi-arid Soils of the Caatinga Biome of Northeastern Brazil. In: **The Soils of Brazil**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 175-193. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19949-3_6.

ARRUDA, D. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; CORRÊA, G. R.; RODRIGUES, P. M. S.; DUQUE-BRASIL, R.; FERREIRA-JR, W. G.; OLIVEIRA-FILHO, A.T. Landforms and soil attributes determine the vegetation structure in the Brazilian semiarid. **Folia Geobot**, v. 50, p. 175-184, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12224-015-9221-0>.

AUSTIN, A. T.; VIVANCO, L. Decomposição de serapilheira vegetal em um ecossistema semiárido controlado por fotodegradação. **Nature**, v. 442, n. 7102, p. 555-558, 2006. <https://doi.org/10.1038/nature05038>.

BARBOSA, W. R.; ROMERO, R. E.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; COOPER, M.; SARTOR, L. R.; MOYA PARTITI, C. S.; JORGE, F. O.; COHEN, R.; DE JESUS, S. L.; FERREIRA, T. O. Effects of slope orientation on pedogenesis of altimontane soils from the Brazilian semi-arid region (Baturité massif, Ceará). **Environmental earth sciences**, v. 73, p. 3731-3743, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3660-4>.

BASTOS, F. H.; LIMA, D. L. S.; CORDEIRO, A. M. N.; MAIA, R. P. Relevos graníticos do nordeste brasileiro: uma proposta taxonômica. **Revisões de literatura da geomorfologia brasileira**, 2021.

BENSLAMA, A.; LUCAS, I. G.; JORDAN VIDAL, M. M.; ALMENDRO-CANDEL, M. B.; NAVARRO-PEDREÑO, J. Carbon and Nitrogen Stocks in Topsoil under Different Land Use/Land Cover Types in the Southeast of Spain. **AgriEngineering**, v. 6, n. 1, p. 396-408, 2024. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6010024>.

BERNARDI, A. C. C.; TADINI, A. M.; BIELUCZYK, W.; PEZZOPANE, J. R. M.; MACHADO, P. L. O. A.; MADARI, B. E.; MARTIN NETO, L. **Manejo conservacionista da matéria orgânica do solo: sistema de integração lavoura-pecuária-floresta**. In: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN NETO, L.; ANDRADE, C. A. (Eds.). Entendendo a Matéria Orgânica Do Solo Em Ambientes Tropical e Subtropical. Embrapa, Brasília, 2023, p. 569.

BÉTARD, F. Spatial variations of soil weathering processes in a tropical mountain environment: The Baturité massif and its piedmont (Ceará, NE Brazil). **Catena**, v. 93, p. 18-28, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.01.013>.

BEUCHLE, R.; GRECCHI, R. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; SELIGER, R.; EVA, H. D.; SANO, E.; ACHARD, F. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. **Applied Geography**, v. 58, p. 116-127, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.01.017>

BORGES NETO, I. O.; XAVIER, R. A.; SOUZA, B. I.; SANTOS, L. J. C.; SOARES, D. A.; SOUZA, J. J. L. L. Preliminary experimental data on surface runoff and soil loss in the Caatinga. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 48, n. 9, p. 1712-1723, 2023. <https://doi.org/10.1002/esp.5581>.

BRAMER, I.; ANDERSON, B. J.; BENNIE, J.; BLADON, A. J.; DE FRENNE, P.; HEMMING, D.; HILL, R. A.; KEARNEY, M. R.; KÖRNER, C.; KORSTJENS, A. H.; LENOIR, J.; MACLEAN, I. M. D.; MARSH, C. D.; MORECROFT, M. D.; OHLEMÜLLER, R.; SLATER, H. D.; SUGGITT, A. J.; ZELLWEGER, F.; GILLINGHAM, P. K. Advances in monitoring and modelling climate at ecologically relevant scales. In: **Advances in ecological research**. Academic Press, 2018. p. 101-161. <https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2017.12.005>.

BURKE, A. Determinantes de floras de inselbergs em paisagens áridas de Nama Karoo. **Journal of Biogeography**, v. 28, n. 10, p. 1211-1220, 2001. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2001.00623.x>.

BURKE, A. Properties of soil pockets on arid Nama Karoo inselbergs—the effect of geology and derived landforms. **Journal of Arid Environments**, v. 50, n. 2, p. 219-234, 2002. <https://doi.org/10.1006/jare.2001.0907>.

CHEN, D.; XING, W.; LAN, Z.; SALEEM, M.; WU, Y.; HU, S.; BAI, Y. Efeitos diretos e indiretos do enriquecimento de nitrogênio em organismos do solo e mineralização de carbono e nitrogênio em uma pastagem semiárida. **Functional Ecology**, v. 33, n. 1, p. 175-187, 2019. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13226>.

CHENCHOUNI, H.; NEFFAR, S. Soil organic carbon stock in arid and semi-arid steppe rangelands of North Africa. **Catena**, v. 211, p. 106004, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.106004>.

CLARK-IOANNOU, S. M.; WARDELL-JOHNSON, G. W.; MILLETT, J. Multi-scale biogeographic controls over plant communities on granite outcrops in the Southwest Australian Floristic Region. **Austral Ecology**, v. 46, n. 4, p. 627-639, 2021. <https://doi.org/10.1111/aec.13018>.

CONFORTI, M.; LONGOBUCCO, T.; SCARCIGLIA, F.; NICEFORO, G.; MATTEUCCI, G.; BUTTAUFUOCO, G. Interplay between soil formation and geomorphic processes along a soil catena in a Mediterranean mountain landscape: an integrated pedological and geophysical approach. **Environmental Earth Sciences**, v. 79, n. 2, p. 59, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8802-2>.

CONFORTI, M.; LUCÀ, F.; SCARCIGLIA, F.; MATTEUCCI, G.; BUTTAFUOCO, G. Soil carbon stock in relation to soil properties and landscape position in a forest ecosystem of southern Italy (Calabria region). **Catena**, v. 144, p. 23-33, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.04.023>.

CORRÊA, A. C. B.; TAVARES, B. A. C.; MONTEIRO, K. A.; CAVALCANTI, L. C. S.; LIRA, D. R. Megamorfologia e morfoestrutura do Planalto de Borborema. **Revista do Instituto Geológico (Descontinuada)**, v. 31, n. 1-2, p. 35-52, 2010. <https://doi.org/10.5935/0100-929X.20100003>.

BALLÉN, L. A.; SOUZA, B. I.; LIMA, E. R. V. Analysis of the spatial and temporal variations of vegetation cover in the environmental protection area of Cariri, Paraíba, Brazil. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 36, n. 3, p. 555-571, 2016. <https://doi.org/10.5216/bgg.v36i3.44558>.

COSTA, H. L.; DINIZ, M. T. M.; XAVIER, R. A.; QUEIROZ, L. S.; MAIA, R. P. Quantitative assessment of the geomorphological heritage of the Pedra da Boca State Park's surroundings: Key geoheritage site in Northeast Brazil. **International Journal of Geoheritage and Parks**, v. 11, n. 3, p. 433-449, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2023.07.001>.

DCA-UFCG, **Precipitação Mensal do Estado da Paraíba: 1911/1990**. Departamento de Ciências Atmosféricas/Universidade Federal de Campina Grande, 2020.

ESCH, E. H.; KING, J. Y.; CLELAND, E. E. Foliar litter chemistry mediates susceptibility to UV degradation in two dominant species from a semi-arid ecosystem. **Plant and Soil**, v. 440, p. 265-276, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04069-y>.

FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A. H. B. M. Cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo. **Embrapa Pantanal**, Corumbá, 2008.

FILGUEIRAS, T. S.; NOGUEIRA, P. E.; BROCHADO, A. L.; GUALA, G. F. Caminhamento: um método expedito para levantamentos florísticos qualitativos. **Cadernos de geociências**, v. 12, n. 1, p. 39-43, 1994.

Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>. Acessado em: 20 set. 2024.

FONSECA, J. S.; CAMPOS, M. C. C.; BRITO FILHO, E. G.; MANTOVANELLI, B. C.; SILVA, L. S.; LIMA, A. F. L.; CUNHA, J. M.; SIMÕES, E. L.; SANTOS, L. A. C. Soil-landscape relationship in a sandstone-gneiss topolithosequence in the State of Amazonas, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 80, p. 1-15, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-10026-9>.

FREITAS, A. D. S.; SAMPAIO, E.; SANTOS, C.; SILVA, A.; CARVALHO, R. Fixação biológica de nitrogênio no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, p. 585-597, 2015. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.0.p585-597>.

FREITAS, D. F.; KER, J. C.; SILVA FILHO, L. A.; PEREIRA, T. T. C.; SOUZA, O. F. F.; SCHAEFER, C. E. G. R. Pedogeomorphology and paleoenvironmental implications of large termite mounds at the Brazilian semiarid landscape. **Geomorphology**, v. 387, p. 107762, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107762>.

GELAW, A. M.; SINGH, B. R.; LAL, R. Soil organic carbon and total nitrogen stocks under different land uses in a semi-arid watershed in Tigray, Northern Ethiopia. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 188, p. 256-263, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.02.035>.

GILLINGHAM, P. K.; PALMER, S. C. F.; HUNTLEY, B.; KUNIN, W. E.; CHIPPERFIELD, J. D.; THOMAS, C. D. The relative importance of climate and habitat in determining the distributions of species at different spatial scales: a case study with ground beetles in Great Britain. **Ecography**, v. 35, n. 9, p. 831-838, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2011.07434.x>.

GRAND, S.; LAVKULICH, L. M. Effects of forest harvest on soil carbon and related variables in Canadian spodosols. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, n. 5, p. 1816-1827, 2012. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0103>.

GROHMANN, F. Superfície específica do solo de unidades de mapeamento do estado de São Paulo: II-Influência da matéria orgânica, dos óxidos de ferro livres e dos cátions trocáveis, na superfície específica total do solo. **Bragantia**, v. 31, p. 167-185, 1972.

GRÜNEBERG, E.; ZICHE, D.; WELLBROCK, N. Organic carbon stocks and sequestration rates of forest soils in Germany. **Global change biology**, v. 20, n. 8, p. 2644-2662, 2014. <https://doi.org/10.1111/gcb.12558>.

HINTON, P. R. **Statistics explained**. Routledge, 2014. <https://doi.org/10.4324/9781315797564>.

HUDSON, B. D. Soil organic matter and available water capacity. **Journal of soil and water conservation**, v. 49, n. 2, p. 189-194, 1994. <https://doi.org/10.1081/E-ENRL-120049130>.

HUSSAIN, M. B.; AL-HADIDI, S. H.; ERFANIAN, M. B.; YAHIA, M. N. D.; MULLUNGAL, M. N.; ALSAFRAN, M.; BAI, Y.; ALATALO, J. M. Photodegradation and its effect on plant litter decomposition in terrestrial ecosystems: a systematic review. **Soil Systems**, v. 7, n. 1, p. 6, 2023. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010006>.

IBGE, Coordenação de Recursos Naturais; AMBIENTAIS, Estudos. **Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1: 250 000**. Rio de Janeiro, IBGE, 2019.

IUSS Working Group WRB. **World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps**. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022.

KAYANO M. T.; ANDREOLI, R. V. Clima da Região Nordeste do Brasil. In: CAVALCANTI I. F.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Eds.). **Tempo e Clima No Brasil**. 2009, p. 213-234.

KEPPEL, G.; VAN NIEL, K. P.; WARDELL-JOHNSON, G. W.; YATES, C. J.; BYRNE, M.; MUCINA, L.; SCHUT, A. G. T.; HOPPER, S. D.; FRANKLIN, S. E. Refugia: identificando e entendendo refúgios seguros para a biodiversidade sob mudanças climáticas. **Ecologia global e biogeografia**, v. 21, n. 4, p. 393-404, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00686.x>.

KRASILNIKOV, P.; GUTIÉRREZ-CASTORENA, M. C.; AHRENS, R. J.; CRUZ-GAISTARDO, C. O.; SEDOV, S.; SOLLEIRO-REBOLLEDO, E. **The soils of Mexico**. Springer Science & Business Media, 2013. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5660-1>.

LAGES, G. A.; FERREIRA, R. V.; MENESES, L. F.; NASCIMENTO, M. A. L.; FIALHO, D. Projeto Geoparques: Geoparque Cariri Paraibano. **Serviço Geológico do Brasil–CPRM**, 2018.

LAGES, G. A.; MARINHO, M. S.; NASCIMENTO, M. A. L.; MEDEIROS, V. C.; DANTAS, E. L. Geocronologia e feições estruturais e petrológicas do Plúton Bravo, Domínio Central da Província Borborema, Nordeste do Brasil: um granito transalcalino inicial no estágio pós-colisional da Orogenia Brasileira. **Brazilian Journal of Geology**, v. 46, p. 41-61, 2016. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620150033>.

LAGES, G. A.; MARINHO, M. S.; NASCIMENTO, M. A. L.; MEDEIROS, V. C.; DANTAS, E. L.; FIALHO, D. **Mar de Bolas do Lajedo do Pai Mateus, Cabaceiras, PB Campo de matações graníticos gigantes e registros rupestres de civilização pré-colombiana**. In: WINGE, M.; SCHOBENHAUS, C.; SOUZA, C. R. G.; FERNANDES, A. C. S. (Ed.). **Sítios Geológicos e Paleontológicos Do Brasil**.

LAL, R. Carbon cycling in global drylands. **Current climate change reports**, v. 5, p. 221-232, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40641-019-00132-z>.

LAL, R. Soil organic matter and water retention. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 5, p. 3265-3277, 2020. <https://doi.org/10.1002/agj2.20282>.

LI, X.; CHANG, S. X.; SALIFU, K. F. Soil texture and layering effects on water and salt dynamics in the presence of a water table: a review. **Environmental reviews**, v. 22, n. 1, p. 41-50, 2014. <https://doi.org/10.1139/er-2013-0035>.

LOPEZ, B. R.; BACILIO, M. Weathering and soil formation in hot, dry environments mediated by plant–microbe interactions. **Biology and Fertility of Soils**, v. 56, n. 4, p. 447-459, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01456-x>.

LÓPEZ-FANDO, C.; PARDO, M. T. Armazenamento e estratificação de carbono no solo sob diferentes sistemas de preparo do solo em uma região semiárida. **Soil and Tillage Research**, v. 111, n. 2, p. 224-230, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.10.011>.

LOURENÇO, E. R. C.; SOUZA, B. I.; D'ANDREA, A. F.; SOUZA, J. J. L. L. Temporal variation of soil CO₂ emission in different land uses in the Caatinga. **Applied Geography**, v. 140, p. 102661, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102661>.

LUNGUINHO, R. **Nos caminhos dos relevos residuais contribuição à ecohidrologia de encostas no semiárido brasileiro**. 2018. 267 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal da Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Geografia. João Pessoa, 2018. Available at: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/13602>.

MAIA, R. P.; BEZERRA, F. H. R.; NASCIMENTO, M. A. L.; CASTRO, H. S.; MEIRELES, A. J. de A.; ROTHIS, L. M. Geomorfologia do campo de inselbergues de Quixadá, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, 2015. <https://doi.org/10.20502/rbg.v16i2.651>

MAIA, R. P.; NASCIMENTO, M. A. L. Relevos graníticos do Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 2, 2018. <https://doi.org/10.20502/rbg.v19i2.1295>.

MATMON, A.; MUSHKIN, A.; ENZEL, Y.; GRODEK, T.; ARNOLD, M.; AUMAÎTRE, G.; BOURLÈS, D.; KEDDADOUCHE, K. Erosão de um inselberg de granito, Gross Spitzkoppe, deserto do Namibe. **Geomorphology**, v. 201, p. 52-59, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.06.005>.

MENEZES, R.; SAMPAIO, E.; GIONGO, V.; PÉREZ-MARIN, A. Ciclagem biogeoquímica em ecossistemas terrestres do Bioma Caatinga. **Revista Brasileira de Biologia**, v. 72, p. 643-653, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000400004>.

MEYER, N.; KUHWALD, M.; PETERSEN, J. F.; DUTTMANN, R. Soil development in weathering pits of a granitic dome (Enchanted Rock) in central Texas. **Catena**, v. 199, p. 105084, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105084>.

MIGÓN, P. Granite Landscapes of the World. **Oxford University Press**. 2006. <https://doi.org/10.1093/oso/9780199273683.001.0001>.

MIGÓN, P.; MAIA, R. P. Pedra da Boca, Pai Mateus, and Quixadá—three possible key geoh heritage sites in Northeast Brazil. **Geoheritage**, v. 12, n. 3, p. 51, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12371-020-00473-4>.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. **European journal of soil science**, v. 69, n. 1, p. 39-47, 2018. <https://doi.org/10.1111/ejss.12475>.

MURPHY, B. W. Impact of soil organic matter on soil properties - a review with emphasis on Australian soils. **Soil Research**, v. 53, n. 6, p. 605-635, 2015. <https://doi.org/10.1071/SR14246>.

NASCIMENTO, M. A. L.; GALINDO, A. C.; MEDEIROS, V. C. Ediacaran to Cambrian magmatic suites in the Rio Grande do Norte domain, extreme Northeastern Borborema Province (NE of Brazil): Current knowledge. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 58, p. 281-299, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.09.008>.

NASCIMENTO, S. S.; LIMA, E. R. V.; LIMA, P. P. S. Análise temporal da degradação da Caatinga na Sub-Bacia do Alto Paraíba. **OKARA**, v. 8, n.1, p. 72–93, 2014.

NOY-MEIR, I. Desert ecosystems: environment and producers. **Annual review of ecology and systematics**, p. 25-51, 1973. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000325>.

OLIVEIRA FILHO, J. S.; BARROZO, M. V. S.; PEREIRA, M. G. Fatores ambientais e mudanças no uso da terra que controlam a disponibilidade de fósforo em solos de terras áridas. **Jornal de Ambientes Áridos**, v. 202, p. 104770, 2022a. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104770>.

OLIVEIRA FILHO, J. S.; DINIZ, R. S. N.; SILVA, R. C.; MOREIRA, V. O. G.; VIEIRA, J. M.; BARRETO, M. M. S.; CARVALHO, M. S. B. S.; TRITSCH, I.; SCOPEL, E. Carbon and nitrogen stocks in Lithic soils: Environmental drivers and land-use implication in Brazilian dry ecosystems. **Journal of Soils and Sediments**, v. 24, n. 4, p. 1476-1488, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11368-024-03732-x>.

OLIVEIRA FILHO, J. S.; LOPES, R. O.; ARAÚJO, M. O.; MAGALHÃES, M. S.; DAYSON VASCONCELOS, M. D. S.; LIMA, A. R. L.; BASTOS, F. H.; GERVASIO PEREIRA, M. How does increasing humidity in the environment affect soil carbon and nitrogen stocks and the C/N ratio in tropical drylands? Evidence from northeastern Brazil. **Catena**, v. 213, p. 106208, 2022b. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106208>.

OTTAVIANI, G.; MARCANTONIO, M.; MUCINA, L.; Profundidade do solo molda a diversidade funcional das plantas na vegetação de afloramentos de granito do sudoeste da Austrália. **Plant Ecology & Diversity**, v. 9, n. 3, p. 263-276, 2016. <https://doi.org/10.1080/17550874.2016.1211192>.

PACHECO, A. A.; KER, J. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FONTES, M. P. F.; ANDRADE, F. V.; MARTINS, E. S.; OLIVEIRA, F. S. Mineralogy, micromorphology, and genesis of soils with varying drainage along a hillslope on granitic rocks of the Atlantic Forest Biome, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, p. e0170291, 2018. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170291>.

PENNELL, K. D.; ABRIOLA, L. M.; BOYD, S. A. Área de superfície de matéria orgânica do solo reexaminada. **Soil Science Society of America Journal**, v. 59, n. 4, p. 1012-1018, 1995. <https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900040008x>.

PÉREZ, F. L. Geoeecologia de um domo de granito: Interações espaciais entre gnammas, córregos, solos e cobertura vegetal, Enchanted Rock (Texas, EUA). **Catena**, v. 223, p. 106938, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106938>

PIRES, C. V.; SCHAEFER, C. E. R. G.; HASHIGUSHI, A. K.; THOMAZINI, A.; FILHO, E. I. F.; MENDONÇA, E. S. Reservatórios de carbono orgânico e nitrogênio do solo impulsionam emissões de C-CO₂ do solo de solos selecionados na Antártida Marítima. **Science of the Total Environment**, v. 596, p. 124-135, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.144>.

PLAZA, C.; ZACCONE, C.; SAWICKA, K.; MÉNDEZ, A. M.; TARQUIS, A.; GASCÓ, G.; HEUVELINK, G. B. M.; SCHUUR, E. A. G.; MAESTRE, F. T. Soil resources and element stocks in drylands to face global issues. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 13788, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32229-0>.

POREMBSKI, S.; BARTHLOTT, W. (Ed.). **Inselbergs: Biotic Diversity of Isolated Rock Outcrops in Tropical and Temperate Regions**. Ecological Studies. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. 2000. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-59773-2>.

PRADO, D. E. Seasonally dry forests of tropical south america: from forgotten ecosystems to a new phytogeographic unit. **Edinburgh Journal of Botany**, Volume 57, Issue 3, 2000, p. 437-461. <https://doi.org/10.1017/S096042860000041X>.

QUEIROZ, A. F.; SALVIANO, A. M.; CUNHA, T. J. F.; OLSZEWSKI, N.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; OLIVEIRA NETO, M. B. Potentialities and limitations of agricultural use in soils of semi-arid region of the state of Bahia. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, p. 3373-3387, 2018. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201820180029>.

QUEIROZ, L. P.; CARDOSO, D.; FERNANDES, M. F.; MORO, M. F. Diversity and evolution of flowering plants of the Caatinga domain. **Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America**, p. 23-63, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68339-3_2.

QUEIROZ, R. T.; SOUZA, B. I.; SOUZA, J. J. L. L.; MEDEIROS, J. R.; FONSECA, C. F.; CARDOSO, E. C. M. Extending the limits of Campos Rupestres in Brazil. **Caminhos Geografia**, v. 22, p. 115-137, 2021. <https://doi.org/10.14393/rcg228255806>.

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLÜTER, S.; VOGEL, H. J. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v. 314, p. 122-137, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>.

RAWLS, W. J.; PACHEPSKY, Y. A.; RITCHIE, J. C.; SOBECKI, T. M.; BLOODWORTH, H. Effect of soil organic carbon on soil water retention. **Geoderma**, v. 116, n. 1-2, p. 61-76, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00094-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00094-6)

SALGADO, A. A. R.; BUENO, G. T.; DINIZ, A. D.; MARENT, B. R. Long-term geomorphological evolution of the Brazilian territory. **Landscapes and landforms of Brazil**, p. 19-31, 2015. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8023-0_3.

SALVADOR, M. S. S.; BERNADO, I. E. S.; LIMA, V. R. P.; BORGES NETO, I. O. Floristic diversity in Lajedo do Bravo, Cariri paraibano. **Revista Geotemas**, v. 13, p. e02328-e02328, 2023. <https://doi.org/10.33237/2236-255X.2023.5137>.

SANTOS, H. G.; CARVALHO JUNIOR, W.; DART, R. O.; AGLIO, M. L. D.; SOUZA, J. S.; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTINS, A. L. S.; OLIVEIRA, A. P. O Novo Mapa de Solos do Brasil Legenda Atualizada escala 1:5.000.000. **Embrapa Solos**, Rio de Janeiro. 2011.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. Sistema brasileiro de classificação de solos, 5. ed. **Revista e Ampliada Embrapa**, Brasília, DF, 2018.

SHELLEKENS, J.; JUSTI, M.; MACEDO, R.; CALEGARI, M. R.; BUURMAN, P.; KUYPER, T. W.; CAMARGO, P. B.; VIDAL-TORRADO, P. Long-term carbon storage in Brazilian Cerrado soils—a conjunction of wildfires, bioturbation, and local edaphic controls on vegetation. **Plant and Soil**, v. 484, n. 1, p. 645-662, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05824-4>.

SCHUT, A. G. T.; WARDELL-JOHNSON, G. W.; YATES, C. J.; KEPPEL, G.; BARAN, I.; FRANKLIN, S. E.; HOPPER, S. D.; VAN NIEL, K. P.; MUCINA, L.; BYRNE, M. Rapid characterisation of vegetation structure to predict refugia and climate change impacts across a global biodiversity hotspot. **PLoS One**, v. 9, n. 1, p. e82778, 2014. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082778>.

SILVA, C. A. Matéria orgânica e a fertilidade do solo. In: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN NETO, L.; ANDRADE, C. A. (Eds.), **Entendendo a Matéria Orgânica Do Solo Em Ambientes Tropical e Subtropical**. Embrapa, Brasília, 2023, p. 49-84.

SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; ANDRADE, C. A.; MARTIN-NETO, L.; BETTIOL, W. Matéria orgânica do solo: ciclo, compartimentos e funções. In: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN NETO, L.; ANDRADE, C. A. (Eds.). **Entendendo a Matéria Orgânica Do Solo Em Ambientes Tropical e Subtropical**. Embrapa, Brasília, 2023. p. 17-47.

SILVA, D. G.; CORRÊA, A. C. B. Evolução paleoambiental dos depósitos de tanques em Fazenda Nova, Pernambuco—Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, n. 2, p. 43-56, 2009. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/232639>. Acesso em: 11 mar. 2025.

SILVA, J. M. C.; BARBOSA, L. C. F.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. The Caatinga: Understanding the Challenges. In: SILVA, J. M. C.; TABARELLI, M. (eds.), **A Caatinga: entendendo os desafios. Caatinga: a maior região de floresta tropical seca da América do Sul**, p. 3-19, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68339-3_1.

SKUJINŠ, J. Nitrogen cycling in arid ecosystems. **Ecological Bulletins**, p. 477-491, 1981.

SOUZA, A. S. V.; MAIA, R. P.; BEZERRA, F. H.; MIGOÑ, P.; SIAME, L. L. Granitic inselberg erosion controlled by dike swarm array in semiarid Brazil. **Geomorphology**, v. 440, p. 108865, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108865>.

SOUZA, B. I.; MENEZES, R.; ARTIGAS, R. C. Efeitos da desertificação na composição de espécies do bioma Caatinga, Paraíba/Brasil. **Investigaciones geográficas**, n. 88, p. 45-59, 2015. <https://doi.org/10.14350/rig.44092>.

SOUZA, B. I.; SOUZA, R. S.; Processo de ocupação dos Cariris Velhos–PB e efeitos na cobertura vegetal: contribuição à Biogeografia Cultural do semiárido. **Caderno de Geografia**, v. 26, n. 2, p. 229-258, 2016. <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2016v26nesp2p229>.

SOUZA, J. J. L. L.; CASTRO, F. E.; ANDRADE, C. V. P. A.; KER, J. C.; PEREZ FILHO, A. Brazilian semiarid soils formed during the last glacial maximum. **Catena**, v. 223, p. 106899, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106899>.

SOUZA, J. J. L. L.; MEDEIROS, V. B.; OLIVEIRA, P. E.; SOUZA, B. I.; BARRETO, A. M. F.; OLIVEIRA, É. V.; PESSEDA, L. C. R. Vegetable coverage, anthropogenic action, and paleoclimates in the Caatinga. **Mercator (Fortaleza)**, v. 22, p. e22011, 2023. <https://doi.org/10.4215/rm2023.e22011>.

SOUZA, J. J. L. L.; SOUZA, B. I.; XAVIER, R. A.; CARDOSO, E. C. M.; MEDEIROS, J. R.; FONSECA, C. F.; SCHAEFER, C. E. G. R. Organic carbon rich-soils in the brazilian semiarid region and paleoenvironmental implications. **Catena**, v. 212, p. 106101, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106101>.

SOUZA, N. R. L.; XAVIER, R. A. A importância dos “lajedos” na paisagem geomorfológica do Cariri Paraibano. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p. 6561-6566, 2017. <https://doi.org/10.20396/sbgfa.v1i2017.2585>.

SOUZA, N. R. L.; XAVIER, R. A.; NETO, I. O. B. Geodiversidade e Patrimônio Geomorfológico do Plúton Bravo no semiárido paraibano. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 25, n. 1, 2024. <https://doi.org/10.20502/rbgeomorfologia.v25i1.2460>.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. John Wiley & Sons, 1994.

STEWART, B. A.; LAL, R. Managing water to enhance global cereal yields. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 73, n. 2, p. 49A-52A, 2018. <https://doi.org/10.2489/jswc.73.2.49A>.

TADINI, A. M.; NICOLODELLI, G.; SENESI, G. S.; ISHIDA, D. A.; MONTES, C. R.; LUCAS, Y.; MOUNIER, S.; GUIMARÃES, F. E. G.; MILORI, D. M. B. P. Soil organic matter in podzol horizons of the Amazon region: Humification, recalcitrance, and dating. **Science of the Total Environment**, v. 613, p. 160-167, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.068>.

TANG, X.; HU, J.; LU, Y.; QIU, J.; DONG, Y.; LI, B.; Soil C, N, P stocks and stoichiometry as related to land use types and erosion conditions in lateritic red soil region, south China. **Catena**, v. 210, p. 105888, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105888>.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Revista e Ampliada Embrapa, Brasília, DF. 2017, p. 574.

TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M. S. P.; BARBOSA, A. A.; RODRIGUEZ, D. A.; OLIVEIRA SANTANA, M.; SESTINI, M. F. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000–2016. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 73, p. 197-206, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.012>.

TORMENA, C. A.; SÁ, J. C. M.; FIGUEIREDO, G. C.; SEVERIANO, E. C.; GUIMARÃES, R. M. L.; LIMA, R. P. Relações da matéria orgânica com atributos físicos de solos de regiões subtropicais e tropicais brasileiras. In: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN NETO, L.; ANDRADE, C. A. (Eds.), **Entendendo a Matéria Orgânica Do Solo Em Ambientes Tropical e Subtropical**. Embrapa, Brasília. 2023.

TWIDALE, C. R. The two-stage concept of landform and landscape development involving etching: origin, development and implications of an idea. **Earth-Science Reviews**, v. 57, n. 1-2, p. 37-74, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00059-9](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00059-9).

TWIDALE, C. R.; BOURNE, J. A. Rock basins (gnammas) revisited. **Géomorphologie: relief, processus, environnement**, v. 24, n. 2, p. 139-149, 2018. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11880>.

TWIDALE, C. R.; ROMANÍ, J. R. V. **Relevo e geologia de terrenos graníticos**. CRC Press, 2005.

WANG, Q.; PIERISTÈ, M.; LIU, C.; KENTA, T.; ROBSON, T. M.; KUROKAWA, H. The contribution of photodegradation to litter decomposition in a temperate forest gap and understorey. **New Phytologist**, v. 229, n. 5, p. 2625-2636, 2021. <https://doi.org/10.1111/nph.17022>.

WOSTEN, J. H. M.; GROENENDIJK, P.; VERAART, J. A.; VAN DER LUGT, L. M. **Soil organic matter and its importance for water management**. Stowa, 2019.

XAVIER, R. A. Processos geomorfológicos e evolução da paisagem no semiárido brasileiro. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 7, n. 1, p. 59-69, 2021. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n1ID20692>.

YADAV, R. S.; YADAV, B. L.; CHHIPA, B. R. Litter dynamics and soil properties under different tree species in a semi-arid region of Rajasthan, India. **Agroforestry systems**, v. 73, p. 1-12, 2008. <https://doi.org/10.1007/s10457-008-9106-9>.

YAO, B.; ZENG, X.; PANG, L.; KONG, X.; TIAN, K.; JI, Y.; SUN, S.; TIAN, X. The photodegradation of lignin methoxyl C promotes fungal decomposition of lignin aromatic C measured with ¹³C-CPMAS NMR. **Journal of Fungi**, v. 8, n. 9, p. 900, 2022. <https://doi.org/10.3390/jof8090900>.

YATES, C. J.; ROBINSON, T.; WARDELL-JOHNSON, G. W.; KEPPEL, G.; HOPPER, S. D.; SCHUT, A. G. T.; BYRNE, M. High species diversity and turnover in granite inselberg floras highlight the need for a conservation strategy protecting many outcrops. **Ecology and Evolution**, v. 9, n. 13, p. 7660-7675, 2019. <https://doi.org/10.1002/ece3.5318>.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988. <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>.

6. MATÉRIA ORGÂNICA DOS SOLOS EM INSELBERGS NA CAATINGA

Neste capítulo buscou-se analisar os principais mecanismos de persistência da matéria orgânica nos solos desenvolvidos em bolsões de inselbergs na Caatinga. Baseado no capítulo anterior (item 6.1), utilizou-se técnicas e procedimentos laboratoriais, como fracionamento físico, termoquimólise e assinaturas isotópicas, com a finalidade de compreender os mecanismos de estabilização da matéria orgânica desses solos. As características excepcionais da matéria orgânica, num contexto semiárido, reforçam a importância dos bolsões de solo em inselbergs na Caatinga, sobretudo para o sequestro de CO₂ e mitigação dos impactos das mudanças climáticas.

6.1 MECANISMOS DE PERSISTÊNCIA DA MATÉRIA ORGÂNICA DOS SOLOS DE BOLSÕES EM INSELBERGS NA CAATINGA

6.1.1 Resumo

Este estudo analisou a matéria orgânica do solo (MOS) em áreas típicas da Caatinga e em Campo de Inselbergs Graníticos (CIG), considerando frações particuladas (MOP) e associadas a minerais (MOAM), teores de C e N, relação C/N, composição bioquímica e assinaturas isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$. Para contrastar os diferentes contextos paisagísticos, foram selecionadas amostras de 10 perfis de solo, sendo 8 para o CIG com teores elevados de carbono orgânico (CO) e em diferentes posições topográficas e 2 para a Caatinga típica de maior abrangência espacial. Os resultados destacam que a MOAM apresenta maiores teores de C e N e relação C/N mais baixa em comparação à MOP, indicando provavelmente sua natureza mais humificada, ligada à associação organo-mineral e enriquecimento em N microbiano. A redução de C e N com a profundidade reflete menor aporte vegetal e maior atividade microbiana em horizontes subsuperficiais, exceto em horizontes enterrados nos solos do CIG, onde processos erosivos sazonais promovem soterramento e preservação da MOS. A maior persistência da MOS no CIG pode ser atribuída a uma combinação de mecanismos que atuam via associação organo-mineral, hidrofobicidade e eficiência da ciclagem microbiana. Enquanto na Caatinga típica, condições semiáridas aceleram a oxidação da MOS, aumentando a abundância

relativa de compostos aromáticos. As assinaturas isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ confirmaram predominância de plantas C_3 no CIG, com enriquecimento em ^{13}C em profundidade devido à decomposição microbiana. O enriquecimento de $\delta^{15}\text{N}$ na MOP, em profundidade, sugere fixação biológica de N_2 , por outro lado, os valores mais elevados na MOAM em relação a MOP, indica uma MOS mais humificada (maior estabilidade). Conclui-se que os mecanismos de persistência da MOS na Caatinga são sensíveis a fatores climáticos e pedológicos. No CIG, a maior umidade e aporte vegetal tendem a sustentar mecanismos de proteção, enquanto na Caatinga típica, a aridez pode promover uma aceleração da degradação. A preservação da vegetação nativa nos bolsões de solo do CIG é indispensável para mitigar perdas de C sob a égide das mudanças climáticas, destacando a MOS como indicador-chave de resiliência ecossistêmica em regiões semiáridas.

Palavras-chave: MOP, MOAM, composição bioquímica, atividade microbiana, isótopos estáveis, Semiárido.

6.1.2 Introdução

O solo é o maior reservatório de carbono orgânico (CO), contando com cerca de 3.000 Pg de C (Angst *et al.*, 2022; IPCC, 2013; Köchy *et al.*, 2015; Ussiri; Lal, 2017). A matéria orgânica do solo (MOS) atua como uma importante fonte de nutrientes e energia, além de auxiliar na regulação da umidade e temperatura do solo, dos ciclos biogeoquímicos, e processos ecossistêmicos (Hatten; Liles, 2019; Piccolo; Drosos, 2024; Willard *et al.*, 2024).

A dinâmica entre estoque e fonte de gases de efeito atmosférico no solo ocorre no balanço entre o favorecimento do acúmulo ou decomposição da MOS (Locatelli *et al.*, 2025; Willard *et al.*, 2024). É recorrente na literatura a associação da estabilização da MOS a vários mecanismos, por exemplo: a) interações organo-minerais mediadas principalmente por óxidos de ferro e argilas; b) autoassociação; c) hidrofobicidade; agregação e oclusão física; e) potencial redox; e, f) bioquímica através de compostos recalcitrantes (ex. lignina) (Carvalho *et al.*, 2023; Hanke; Dick, 2020; Six *et al.*, 2002;

Sollins *et al.*, 1996). Em solos sob condições tropicais, a formação de microagregados (< 250 μm) parece ser fundamental à persistência e até mesmo ao sequestro de C devido sua proteção contra a decomposição microbiana (Tanaka *et al.*, 2025).

A MOS pode ser discriminada em função de composição química, grau de associação com os minerais e capacidade de resposta às mudanças climáticas (Sokol *et al.*, 2022). Operacionalmente, existe um consenso sobre a necessidade de separar a massa total da MOS em compartimentos que apresentam comportamentos contrastantes (Lavellee *et al.*, 2020). Para minimizar essa complexidade, a MOS pode ser funcionalmente dividida em duas frações principais: matéria orgânica associada aos minerais (MOAM) e matéria orgânica particulada (MOP) (Cambardella; Elliott, 1992). A MOAM é a fração da MOS que está diretamente relacionada com os minerais do solo do tamanho silte e argila (< 53 μm) e é basicamente constituída de moléculas únicas ou fragmentos microscópicos de material orgânico que foram lixiviados diretamente do material vegetal ou sofreram transformação química pela biota do solo (Lavelle *et al.*, 2020; Lehmann; Kleber, 2015). No caso da MOP, considerada mais leve, observa-se principalmente compostos orgânicos mais complexos, não ou parcialmente decompostos, normalmente maiores que 53 μm e apresentam uma taxa de rotatividade mais rápida que a MOAM (Manzoni; Cotrufo, 2024; Sokol *et al.*, 2022; Witzgall *et al.*, 2021).

Os solos de ambientes secos detêm concentrações de CO menores do que os solos de regiões úmidas, todavia, cerca de 32% (646 Pg) dos estoques globais de C estão situados nessas áreas (Plaza *et al.*, 2018). A Caatinga é a maior extensão de Floresta Tropical Seca e o principal domínio paisagístico semiárido da América do Sul (Moro *et al.*, 2024). Sua extensão territorial é de aproximadamente 862.818 km^2 (IBGE, 2019), sendo coberta por uma vegetação xérica, decídua e espinhosa que predominam em superfícies aplainadas em um clima quente e seco há pelo menos 4.000 anos (Queiroz *et al.*, 2017). Nessa região, os solos são geralmente incipientes, rasos, moderadamente ácidos a moderadamente alcalinos, eutróficos e secos na maior parte do ano, com teores de C e N inferiores a 0,6% (Araújo Filho *et al.*, 2023).

Estudos recentes realizados na Caatinga brasileira evidenciaram a ocorrência de solos com altos teores de CO situados e/ou influenciados diretamente pela ocorrência de

afloramentos rochosos cristalinos comumente denominados de inselbergs (Capítulo anterior, item 5; Souza *et al.*, 2022). Essas formas de relevo são frequentemente abordadas na literatura geológica-geomorfológica (Maia; Nascimento, 2018; Twidale; Vidal Romani, 2005) e representam um paradoxo ecológico (Vanschoenwinkel *et al.*, 2025), onde se torna crucial entendermos quais mecanismos podem estar atuando na persistência e funcionalidade da MOS nesses solos incomuns (Lavallee *et al.*, 2020; Meyer *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2022).

A estabilização de MOS é relacionada com diferentes mecanismos que desfavorecem a decomposição por microrganismos, tais como: 1) condições anaeróbicas e potencial redox oriunda de ambientes alagados (Sahrawat, 2003; Marschner, 2021); 2) baixas temperaturas, normalmente associadas às áreas mais elevadas no contexto dos trópicos (Silva Neto *et al.*, 2023); 3) complexos organo-metálicos com Al^{3+} , Fe^{3+} e interação com argilominerais do tipo 1:1 (Dick *et al.*, 2005; Kleber *et al.*, 2015; Sarkar *et al.*, 2018); 4) incêndios passados e presentes e produção de material pirogênico (Glaser *et al.*, 2003); e, 5) complexos organo-metálicos com Ca^{2+} (Rowley *et al.*, 2018). Exceto pela formação de horizontes A chernozêmicos em terrenos cársticos (Melo *et al.*, 2017), os mecanismos mencionados não foram registrados até então na Caatinga. Isso se deve à predominância de condições semiáridas sob embasamento cristalino (Lages *et al.*, 2013; 2016). Diante deste contexto, a hipótese aqui sugerida é de que a composição bioquímica da MOS seja a principal responsável por sua persistência nos solos da Caatinga.

O conhecimento sobre os mecanismos responsáveis pela estabilização da MOS em regiões semiáridas ainda é limitado (Primo *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2025). Em ambientes semiáridos a dinâmica da MOS é criticamente complexa devido às suas características intrínsecas como a irregularidade na distribuição espaço-temporal da precipitação, alta incidência de luz solar, estresse hídrico e condições pedológicas restritivas ao armazenamento de C e N (Araújo Filho *et al.*, 2023; Oliveira Filho *et al.*, 2022). Desta forma, objetivou-se investigar a origem, composição molecular e os possíveis mecanismos de persistência da MO em solos com altos teores de CO situados em inselbergs na Caatinga. Para isso, integramos as seguintes análises: a) fracionamento físico da MOS para avaliar sua interação com frações minerais; b)

assinaturas isotópicas ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$) para rastrear as fontes vegetais da MOS (plantas C_3 ou C_4) e processos de ciclagem de N; e, c) termoquimólise via HTMA off-line cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas (HTMA-GC/MS) para identificar a composição bioquímica (qualidade da MOS).

Insights importantes sobre a distribuição da MOS e suas respectivas respostas frente às mudanças ambientais/climáticas podem ser obtidas analisando as frações MOP e MOAM (Witzgall *et al.*, 2021). Essas frações também permitem rastrear as possíveis origem dos materiais que compõem a MOS, como resíduos vegetais, animais e/ou microbianos (Chen *et al.*, 2024; Primo *et al.*, 2024), além da distinção dos graus de proteção físico-química (Lavellee *et al.*, 2020; Locatelli *et al.*, 2025; Willard *et al.*, 2024) e da qualidade da serrapilheira (Lyu *et al.*, 2023).

6.1.3 Materiais e Métodos

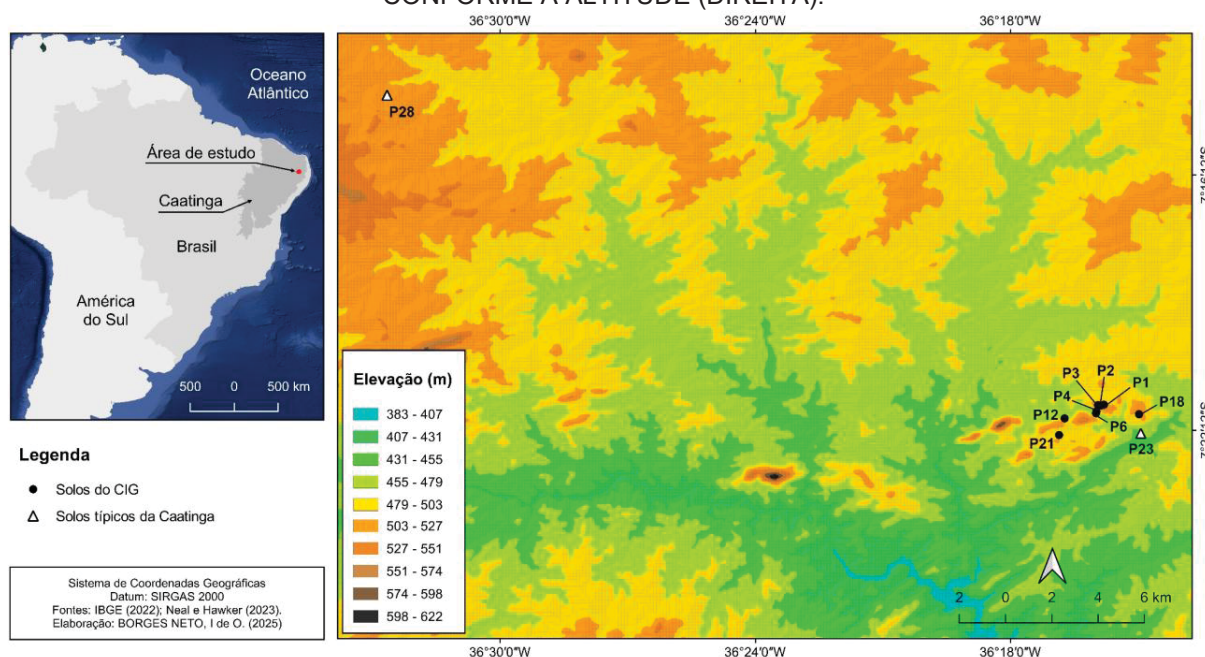
6.1.3.1 Área de estudo

A área de estudo está situada na região mais seca da Caatinga e consequentemente do Brasil (Prado, 2003), sujeita ao clima semiárido (Bsh), de acordo com a classificação de Köppen (Ballén *et al.*, 2016) (Figura 22). Registros palinológicos próximos a área de estudo (<30 km de distância) relatam que este clima atua há pelo menos 4.900 anos (Souza *et al.*, 2023). A vegetação é composta por espécies arbustivas, principalmente pioneiras, caracterizando uma paisagem amplamente antropizada (Silva *et al.*, 2017). Na maioria das vezes, a composição florística, é dominada por espécies como *Aspidosperma pyrifolium* (Pereiro), *Jatropha molíssima* (Pinhão Bravo), *Xiquexique gounellei* (Xique-Xique), e *Prosopis juliflora* (Algaroba) (Souza *et al.*, 2015).

O relevo é caracterizado por superfícies aplainadas a suavemente onduladas sobre gnaisses e xistos. Inselbergs de afloramentos graníticos ocorrem abruptamente por serem mais resistentes ao intemperismo e compõem o CIG (Souza; Xavier; Borges Neto, 2024; Xavier, 2021). Em ambientes com predominância de granitos neoproterozoicos e granitóides ricos em feldspato, predominam os Neossolos Litólicos (Leptosols, 34% da área total), Neossolos Regolíticos (Regosols, 9%) e Cambissolos (Cambisols, 1%). Áreas

com gnaisses e xistos associados a colinas amplas e suaves são frequentemente associadas à ocorrência dos Luvisolos (Luvisols, 22%) e Argissolos (Acrisols, 19%). Nos vales sazonalmente alagados, encontram-se principalmente os Planossolos (Planosols, 13%) e os Vertissolos (Vertisols, 1%) conforme Araújo Filho *et al.* (2023) e Santos *et al.* (2011).

FIGURA 22 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO (ESQUERDA) E DISTRIBUIÇÃO DOS PERFIS CONFORME A ALTITUDE (DIREITA).



FONTE: IBGE (2022) e Neal e Hawker (2023). Elaboração própria (2025).

Esta região tem um histórico de ocupação antiga que remonta aos últimos 2 mil anos, que se intensificou desde a colonização europeia no século XVII (Souza; Souza, 2016). Atividades antrópicas como desmatamento extensivo, pecuária e agricultura são as principais responsáveis por esta região ser um dos centros mais críticos de desertificação do Brasil (Souza *et al.*, 2015; Tomasella *et al.*, 2018).

6.1.3.2 Procedimentos metodológicos

6.1.3.2.1 Amostragem e principais propriedades dos solos

Foram selecionados 30 horizontes em 10 perfis de solo (Tabela 7), escavados, descritos e classificados (Figura 22), segundo o World Reference Base Soil Classification System (IUSS Working Group WRB, 2022) e o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (Santos *et al.*, 2018). Para efeito de comparação, os perfis de solo foram divididos em dois grupos, sendo: a) oito perfis de solo desenvolvidos em campos de inselbergs graníticos – CIG – (P1, P2, P3, P4, P6, P12, P18 e P21); e, b) dois solos típicos da Caatinga (P23 e P28).

Essa seleção buscou contrastar os distintos contextos paisagísticos analisados no Capítulo anterior (item 5): no CIG, a maior amostragem de perfis, levou em consideração os horizontes com os maiores teores de CO e que refletissem a complexidade geomorfológica dessas áreas, evidenciando uma série de bolsões de solos em diferentes posições topográficas, enquanto na Caatinga típica, mesmo em menor número, os solos são representativos do que é esperado para esse ambiente.

Os solos do CIG foram classificados predominantemente como Neossolos Regolíticos (5) e Litólico (1), seguidos pelos Cambissolos Húmicos (2). Enquanto Luvisso Crômico (1) e Neossolo Regolítico (1) foram identificados na Caatinga típica. Em geral, as profundidades variaram de 20 a 125 cm (Tabela 7). Horizontes enterrados (sufixo “b”) foram observados apenas no CIG. Independente do contexto paisagístico, a textura tem predominância da fração areia grossa, com valores percentuais médios de $52,7 \pm 10$ para o CIG e de $38,1 \pm 10,1$ para a Caatinga típica. Por outro lado, a fração argila foi em média maior no CIG ($20,8 \pm 5,9$) do que na Caatinga típica ($14,0 \pm 9,3$).

Hor.	Prof. (cm)	pH H ₂ O	pH KCl	ΔpH	P mg/dm ³	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺ Al	SB	t	T	V	m	C	N	C/N	P _{REM} mg L ⁻¹	AG	AF	ST	ARG
C/G soils																								
P1 - Someric Umbrisol (Pantloamic, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico típico																								
Ah1	0-10	5.27	4.24	-1.03	28.6	1.58	0.15	6.96	3.11	0.06	10.6	11.80	11.86	22.40	52.7	0.5	8.02	0.44	18.18	32.5	37.0	10.4	18.3	34.3
2Ah2	10-32	4.82	3.73	-1.09	6.3	0.94	0.17	1.78	0.68	1.17	9.4	3.57	4.74	12.97	27.5	24.7	2.83	0.18	15.72	23.0	49.3	16.0	12.4	22.3
2AC	32-50	4.27	3.45	-0.82	1.4	0.17	0.28	0.20	0.12	2.73	10.0	0.78	3.51	10.78	7.2	77.8	1.15	0.12	9.46	20.4	54.1	12.1	12.4	21.3
3Ahb	50-65	4.77	3.59	-1.18	2.0	0.15	0.23	0.17	0.13	2.94	9.7	0.68	3.62	10.38	6.6	81.2	1.41	0.11	12.36	11.8	56.4	11.7	14.3	17.5
P2 - Haplic Umbrisol (Pantloamic, Hyperdystric, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico																								
Ah1	0-5	4.97	3.67	-1.30	16.3	0.44	0.17	3.56	1.41	0.65	17.5	5.58	6.23	23.08	24.2	10.4	18.96	0.87	21.84	28.3	45.0	9.4	16.9	28.8
2Ah2	5-25	4.46	3.50	-0.96	4.5	0.14	0.10	0.54	0.22	2.11	14.8	0.99	3.10	15.79	6.3	68.1	5.32	0.41	13.04	20.4	52.3	10.6	13.0	24.1
2Ah3	25-55	4.44	3.77	-0.67	1.6	0.07	0.10	0.05	0.05	2.25	11.8	0.27	2.52	12.07	2.2	89.3	3.00	0.19	15.73	6.9	50.3	12.9	13.1	23.7
P3 - Dystric Regosol (Pantloamic, Humic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico																								
A1	0-2	6.71	6.02	-0.69	28.1	0.29	0.09	3.58	2.01	0.00	1.4	5.97	5.97	7.37	81.0	0.0	1.98	0.11	17.50	46.3	66.2	12.9	7.7	13.2
A2	2-10	6.27	5.29	-0.98	11.7	0.20	0.09	2.67	1.57	0.00	3.0	4.53	4.53	7.53	60.2	0.0	1.10	0.09	12.81	45.8	64.4	13.9	9.0	12.7
P4 - Haplic Umbrisol (Pantloamic, Hyperdystric, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico																								
Ah1	0-8	4.97	3.89	-1.08	19.4	0.29	0.49	4.33	1.47	0.27	10.6	6.58	6.85	17.18	38.3	3.9	6.18	0.31	20.07	41.5	64.8	7.1	7.1	21.0
2Ah2	8-22	4.19	3.42	-0.77	4.0	0.13	0.20	0.41	0.15	2.67	12.9	0.89	3.56	13.79	6.5	75.0	2.18	0.36	6.13	17.7	59.1	7.9	11.8	21.2
2Ah3	22-70	4.32	3.77	-0.55	2.5	0.07	0.10	0.05	0.02	2.05	10.0	0.24	2.29	10.24	2.3	89.5	1.61	0.13	12.31	12.0	60.6	9.2	11.0	19.2
2AC	70-104	4.54	4.08	-0.46	5.5	0.03	0.07	0.03	0.01	1.23	10.1	0.14	1.37	10.24	1.4	89.8	1.02	0.15	6.99	4.0	61.1	6.2	12.4	20.4
3Ahb	104-125	4.58	4.21	-0.37	7.5	0.03	0.07	0.06	0.02	0.94	11.0	0.18	1.12	11.18	1.6	83.9	1.69	0.13	12.69	2.2	57.9	8.2	14.0	19.9
P6 - Cambic Someric Umbrisol (Pantloamic, Humic, Pampaic)/CAMBISOLO HUMICO Distrófico típico																								
Ah	0-8	6.05	4.75	-1.30	25.7	1.98	0.16	2.82	1.62	0.00	4.1	6.58	6.58	10.68	61.6	0.0	2.00	0.16	12.20	45.0	68.0	9.0	9.2	13.8
2Ahb1	8-20	4.62	3.62	-1.00	7.8	0.33	0.09	0.72	0.42	0.98	5.8	1.55	2.53	7.35	21.1	38.7	1.25	0.07	17.90	34.3	69.1	9.0	8.9	13.1
3Ahb2	20-45	4.84	3.57	-1.27	2.2	0.20	0.10	0.47	0.33	2.07	7.6	1.09	3.16	8.69	12.5	65.5	1.15	0.09	12.90	18.1	54.9	12.3	11.9	20.9
4Ahb3	45-90	4.86	3.70	-1.16	1.8	0.16	0.11	0.30	0.17	2.32	8.4	0.75	3.07	9.15	8.2	75.6	1.03	0.10	10.75	11.4	51.1	15.5	8.9	24.5
5Bw	90-125	5.04	3.84	-1.20	2.7	0.08	0.13	0.24	0.10	2.46	7.3	0.55	3.01	7.85	7.0	81.7	0.59	0.08	7.21	4.7	35.0	17.1	19.3	28.6
P12 - Dystric Cambisol (Pantloamic, Raptic)/CAMBISOLO HUMICO Distrófico típico																								
Ah1	0-5	5.17	4.19	-0.98	11.1	0.60	0.20	3.92	1.54	0.29	6.3	6.27	6.56	12.57	49.9	4.4	4.39	0.23	19.51	31.2	41.6	21.4	15.7	21.2
Ah2	5-40	4.63	3.77	-0.86	2.6	0.18	0.05	1.22	0.29	3.14	6.8	1.73	4.87	8.53	20.3	64.5	1.91	0.14	13.53	20.9	38.8	22.4	15.3	23.4
Bw1	40-65	4.83	3.89	-0.94	0.5	0.05	0.03	0.56	0.04	2.76	5.7	0.68	3.44	6.38	10.7	80.2	1.33	0.09	15.33	11.2	37.7	18.7	13.9	29.7
2BW2	65-82	4.64	4.00	-0.64	0.5	0.04	0.05	0.67	0.01	2.00	5.0	0.77	2.77	5.77	13.3	72.2	0.92	0.09	10.18	7.5	39.3	14.8	19.1	26.8
P18 - Haplic Phaeozem (Pantloamic, Pampaic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico																								
Ah1	0-10	5.90	4.87	-1.03	9.9	0.32	0.10	5.53	3.06	0.00	4.6	9.01	9.01	13.61	66.2	0.0	5.28	0.33	15.99	55.9	47.8	17.9	14.0	20.3
Ah2	10-20	5.82	4.49	-1.33	3.9	0.29	0.13	2.12	1.95	0.00	2.7	4.49	4.49	7.19	62.4	0.0	1.40	0.09	15.03	53.2	51.4	20.2	14.1	14.2
2Ahb	20-35	5.53	4.25	-1.28	1.4	0.25	0.20	0.96	1.58	0.00	2.0	3.00	3.00	5.00	60.0	0.0	0.71	0.06	11.99	52.7	56.0	17.7	11.0	15.3
P21 - Eutric Leptosol (Loamic)/NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico																								
Ap	0-20	6.23	5.19	-1.04	19.0	0.91	0.12	4.16	1.30	0.00	0.9	6.49	6.49	7.39	87.8	0.0	0.53	0.06	8.61	50.7	53.1	20.3	16.8	9.8
Solos típicos da Caatinga																								
P23 - Yermic Vertic Luvisol (Epiloamic, Clayic, Hypereutric, Epic)/LUVISOLO CRÔMICO Ôrtico vertissólico																								
A	0-10	6.31	4.67	-1.64	9.6	0.43	0.09	12.92	4.21	0.00	1.1	17.65	17.65	18.75	94.1	0.0	1.15	0.05	23.93	39.8	26.4	27.6	21.5	24.6
Continua																								

Os solos variam entre extremamente ácido e neutro no CIG e na Caatinga típica são basicamente neutros. Esses solos apresentam uma acidez potencial ($H + Al$) média até sete vezes maior do que os solos típicos da Caatinga (Tabela 7). O ΔpH é negativo para todo o conjunto amostral. Da mesma forma, a soma de bases (SB), a capacidade efetiva de troca catiônica (t), a capacidade de troca catiônica (T), o carbono orgânico do solo (C) e o nitrogênio total (N) diminuem com o aumento da profundidade, indicando que as propriedades químicas do solo estão diretamente associadas a MOS. No CIG, o T médio é até duas vezes menor do que o t, enquanto na Caatinga típica são semelhantes. Os valores de fósforo remanescente (P_{REM}) abaixo de 20 mg L^{-1} , no CIG, sugerem alta capacidade de adsorção de P em horizontes subsuperficiais associados a um estágio avançado de intemperismo e pedogênese. O contrário é observado na Caatinga típica, onde os altos valores de P_{REM} (média de 48,87%) indicam baixa capacidade de retenção de P.

A abundância de cátions trocáveis no complexo de troca decresceu na ordem de $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$ em ambos os contextos paisagísticos (Tabela 7). Dos oito perfis de solo no CIG, apenas dois apresentaram saturação de base (V) acima de 50% (P3 e P18). Os valores mais baixos de V foram registrados nos horizontes mais profundos, chegando até 1,4% no horizonte 3A_{hb} do P4. Os solos típicos da Caatinga são eutróficos, com o $V \geq 94,1\%$ em todos os horizontes.

Nos solos do CIG, os teores totais de C e N variaram de 0,53 a 18,96% e de 0,06 e 0,87%, respectivamente (Tabela 7). A relação C/N desses horizontes variou de 6,13 a 21,84. No caso dos solos da Caatinga, foram observados valores médios mais baixos de C e N na ordem de 190% e 310% do que os solos do CIG, respectivamente. Apenas a relação C/N dos solos típicos da Caatinga (média 15,25) foram maiores que as identificadas no CIG (13,56).

6.1.3.2.2 Fracionamento físico da MOS

O fracionamento físico da MOS foi determinado de acordo com Cambardella e Elliott (1992). Amostras de 10 g de solo peneirado com malha de 2 mm foram dispersas em 30 mL de solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}) em agitador horizontal por 15 h, a 120 rpm e 20 °C. Após a agitação, foi utilizada a peneira de 53 μm para separar o material suspenso com o auxílio de água deionizada. Do material retido na peneira, obteve-se a fração de matéria orgânica particulada (MOP), e o que

passou constituiu a fração de matéria orgânica associada aos minerais (MOAM). Ambas as frações foram levadas para estufa a 60 °C em copos descartáveis até a evaporação completa da água. Após o processo de secagem, o material de cada tratamento foi pesado, macerado em almofariz de ágata e peneirado em malha de 100 mesh.

6.1.3.2.3 Determinação dos teores de C e N e assinaturas isotópicas

Os teores de C e N, assim como a assinatura isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ de cada fração física da MOS (MOP e MOAM) foram determinados em analisador elementar (Flash EA 2000, Thermo Fisher Scientific, Bremen, Alemanha). Também foi calculada a média ponderada de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ da MOS para as amostras de acordo com a massa e assinatura de cada fração física.

6.1.3.2.4 Análise da composição bioquímica das frações da MOS

A composição bioquímica das frações da MOS (MOP e MOAM) foi avaliada por termoquimólise mediada por hidróxido de tetrametilamônio (HTMA) off-line, conforme descrito em Chefetz *et al.* (2000) e Del Rio *et al.* (1998).

Amostras de 200 mg de MOP e 100 mg de MOAM foram pesadas e então colocadas diretamente em frascos de vidro (vials), onde foram adicionados 200 μL de solução de hidróxido de tetrametilamônio (HTMA - 25% em metanol), seguido de evaporação sob fluxo de N_2 por 30 min a uma temperatura de 38 °C. Após evaporação completa dos frascos, os mesmos, foram selados e, posteriormente, levados a um forno mufla a 300 °C por 30 min. Após o resfriamento à temperatura ambiente, 1 mL de diclorometano (DCM) foi adicionado aos frascos para extração dos compostos, sendo então agitados por 10 s em um agitador tipo Vortex. Utilizando uma seringa de vidro e agulha, a solução foi removida do frasco e transferida para um tubo de ensaio de 10 mL utilizando um filtro de seringa de PTFE. A extração foi repetida adicionando 1 mL de diclorometano ao frasco contendo as amostras mais 2 vezes.

Após a extração, 50 μL de padrão interno (nonadecanoato de metila - 19:0) foram adicionados aos tubos contendo os extratos de diclorometano. Os tubos de ensaio foram secos novamente sob fluxo de N_2 a 38 °C e, posteriormente, os extratos

foram ressuspensos com 100 μL de diclorometano (três vezes) e, então, transferidos para frascos de GC para análise cromatográfica.

Os produtos da termoquimólise do HTMA foram analisados por cromatografia gasosa acoplada a um espectrômetro de massa em um GC-MS Shimadzu QP 2010 plus equipado com uma coluna capilar RTX-5MS Crossbond 5% difenil/95% dimetil polissiloxano (Restek, 30 cm de comprimento; 0,25 mm de diâmetro interno; espessura do filme de 0,25 μm). O hélio foi o gás de arraste ($3,0 \text{ mL min}^{-1}$), a temperatura da fonte de íons foi ajustada para 200°C , a temperatura da interface para 290°C , e a temperatura do forno foi aumentada de 60° para 300°C a uma taxa de $15^\circ\text{C min}^{-1}$ até 150°C e depois a uma taxa de 4°C min^{-1} até 300°C , com tempo de análise inicial de 3,50 min e tempo final de 48,5 min. O espectro de massas foi obtido com o modo de ionização por impacto de elétrons (70 eV). A integração dos picos dos compostos HTMA foi baseada na comparação com a biblioteca espectral de massa registrada no *Nacional Institute of Standards and Technology* (NIST11, NIST12, NIST62 e WILEY7), utilizando um índice de similaridade e o padrão interno de 85%.

Para calcular a abundância relativa dos compostos, foram utilizadas as áreas dos picos identificados no espectrômetro de massas correspondentes a cada amostra. A análise da abundância relativa dos compostos foi conduzida excluindo os grupos siloxanos e suas respectivas áreas de pico, pois são originários da coluna Rtx, além do padrão interno (Silva *et al.*, 2025).

A origem dos compostos foi classificada e categorizada conforme sua provável origem: a) derivados da lignina (Clifford *et al.*, 1995; Del Rio *et al.*, 1998); b) compostos derivados de carboidratos (Fabbri; Helleur, 1999); c) derivados da quitina (unidade básica das paredes celulares dos fungos e também do exoesqueleto dos insetos - Kögel-Knabner, 2002; Peberdy, 1990); d) derivados da cutina, cujas principais cadeias de carbono dos ésteres e ácidos carboxílicos eram de C_{16} e C_{18} (Kolattukudy, 1981); e) derivados da suberina, correspondendo as moléculas formadas por longas cadeias de hidroxiácidos, ácidos graxos e ésteres metílicos ($> \text{C}_{20}$), éster $18:1\omega$ e diésteres (Kolattukudy, 1981); f) ácidos graxos, menores que 20 átomos de C na cadeia principal (Fatty acid $< \text{C}_{20}$); g) alcanol/álcoois de cadeia longa, maiores que 20 átomos de C (Alkanols long-chain); h) alcanol/álcoois de cadeia média com 18 e 20 átomos de C (Alkanol C_{18} e C_{20}); i) alcanol/álcoois de cadeia curta, são representados com 19 átomos de C ou $\leq$ a 17 átomos de C (Alkanols short-chain); j) alcanos (7-14 átomos de C); k) alcanos (15-26 átomos de C); l) alcanos (27-33 átomos ímpares de C); m)

outros alcanos (alcanos de cadeia longa); n) alcenos; o) compostos marcadores de atividade microbiana (MAM); p) outros lipídios (lipídios que não se encaixam em nenhum grupo); q) proteínas; r) compostos nitrogenados, sendo as moléculas orgânicas contendo funções nitrogenadas; s) Outros (compostos que não se enquadram nas categorias anteriores).

Além disso, esses compostos foram categorizados quanto à estrutura de suas cadeias de carbono, sendo elas classificadas como: i) alicíclicas (compostos alifáticos que apresentam anéis, saturados ou insaturados, sem a presença de anéis benzênicos); ii) os outros alifáticos (compostos que apresentam cadeia carbônica aberta, contendo ou não insaturação); iii) aromáticos (compostos que apresentam pelo menos um anel benzênico em sua composição estrutura, bem como aqueles também classificados como aromáticos heterocíclicos ou mononucleares, que são compostos cíclicos contendo, no anel, um ou mais átomos diferentes de carbono).

6.1.3.2.5 Análise estatística

Para identificar a correlação entre as variáveis empregamos a análise de componentes principais (PCA). PCA é um método de redução de variáveis que produz menos variáveis artificiais e não correlacionadas chamadas Componentes Principais (PCs). Os PCs são listados em ordem decrescente de variância explicada dos dados. Antes da PCA, os dados analíticos eram transformados em logaritmo e padronizados (Hinton, 2014). Todos os procedimentos foram realizados usando o software R versão 4.4.1.

6.1.4 Resultados

6.1.4.1 Teores de C, N, sua relação (C/N) e assinaturas isotópicas de C e N das frações de MOS

Os maiores valores de concentração de C e N foram observados na fração MOAM, variando de 14 a 0,58% e 1,29 a 0,09%, respectivamente. Na fração MOP a concentração de C e N foi menor e os valores variaram entre 12,17 e 0,04% C e de 0,84 a 0,01% N. A concentração de C e N nas frações, em geral, tendem a reduzir com a profundidade do solo (Tabela 8).

Os solos desenvolvidos em CIG possuem os maiores teores de C e N nas duas frações de MOS (Tabela 8). No CIG, os teores de C (e N) variaram na MOAM, respectivamente, de 14 a 1,52% (1,29 a 0,18%), e na MOP de 12,17 a 0,19% (0,84 a 0,01%), enquanto na Caatinga típica os valores não ultrapassaram os 3,41% de C e 0,41% de N na MOAM e 1,01% de C e 0,09% de N na MOP. Os maiores teores C e N em ambas as frações estão preferencialmente nos horizontes superficiais e decrescem com a profundidade do solo, exceto pelos horizontes enterrados (Tabela 8).

No que se refere a relação C/N, a fração MOAM se destaca por ser menor se comparada à fração MOP. Na MOAM a relação C/N variou de 11,82 a 8,45 no CIG e de 8,38 a 6,36 na Caatinga típica. Na MOP os valores da relação C/N variaram de 20,13 a 9,07 no CIG e na Caatinga típica variaram em torno 11,91 (Tabela 8).

As assinaturas $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ das frações MOP e MOAM dos solos no CIG, em geral, indicam materiais com ciclo fotossintético C_3 , sendo possivelmente a principal fonte primária de C e N dos solos nesses ambientes. Apenas o horizonte Ap do P21 da MOAM ficou abaixo de -20 ‰, o que remete a provável contribuição de material com ciclo fotossintético C_4 (Tabela 8). Tal fato provavelmente está atrelado a sua localização mais afastada dos inselbergs (≥ 40 m), o P21 é o único perfil de solo que não recebe aporte hídrico direto das encostas rochosas. Além disso, esse é o perfil de solo mais raso (20 cm) e consequentemente com menor cobertura vegetal de todo o conjunto de dados (Tabela 8; APÊNDICE C), similar ao que ocorre com os solos típicos da Caatinga. No caso dos solos típicos da Caatinga, as assinaturas $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ das frações MOP e MOAM, se apresentam mais enriquecidas quando comparadas aos solos do CIG e provavelmente estão mais associadas a materiais do ciclo fotossintético C_4 .

TABELA 8 - TEORES DE C E N, RELAÇÃO C/N E ASSINATURAS ISOTÓPICAS DAS FRAÇÕES DE MOS.

Hor.	Prof. (cm)	MOP					MOAM									
		C%	δ ¹³ C (‰)	C (mg g soil ⁻¹)	N%	δ ¹⁵ N (‰)	N (mg g soil ⁻¹)	C/N ratio	C%	δ ¹³ C (‰)	C (mg g soil ⁻¹)	N%	δ ¹⁵ N (‰)	N (mg g soil ⁻¹)	C/N ratio	
Solos do C/G																
P1 - Someric Umbrisol (Pantoloamic, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico típico																
Ah1	0-10	7.24	-27.03	50.98	0.49	6.26	3.46	14.75	10.41	-26.47	30.86	0.93	7.83	2.76	11.17	
2Ah2	10-32	2.07	-25.74	17.32	0.16	7.30	1.33	13.01	5.68	-25.80	9.38	0.58	8.91	0.95	9.85	
2AC	32-50	0.91	-25.53	7.07	0.07	6.78	0.53	13.34	1.97	-25.12	4.48	0.19	8.59	0.43	10.42	
3Ahb	50-65	0.44	-25.54	3.27	0.03	8.39	0.26	12.72	2.76	-24.45	7.24	0.27	9.26	0.71	10.26	
P2 - Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Hyperdystric, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico																
Ah1	0-5	12.17	-26.45	113.88	0.84	5.51	7.89	14.43	14.00	-25.97	9.02	1.29	7.19	0.83	10.85	
2Ah2	5-25	4.47	-24.66	40.23	0.36	7.05	3.25	12.37	10.38	-24.91	10.29	1.00	8.48	0.99	10.37	
2Ah3	25-55	1.69	-23.80	14.07	0.16	8.02	1.29	10.87	6.81	-23.94	11.44	0.71	9.62	1.20	9.53	
P3 - Dystric Regosol (Pantoloamic, Humic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico léptico																
A1	0-2	1.24	-23.87	10.89	0.08	9.78	0.68	16.09	6.08	-24.81	7.40	0.51	12.48	0.63	11.84	
A2	2-10	0.64	-23.71	5.36	0.04	9.31	0.37	14.44	4.91	-25.09	7.77	0.44	11.07	0.69	11.30	
P4 - Haplic Umbrisol (Pantoloamic, Hyperdystric, Humic, Raptic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Húmico típico																
Ah1	0-8	4.82	-26.54	42.34	0.32	6.54	2.84	14.89	11.67	-26.02	14.16	1.00	9.54	1.21	11.70	
2Ah2	8-22	1.82	-23.44	14.88	0.13	5.85	1.09	13.71	6.68	-24.40	12.35	0.62	9.45	1.14	10.85	
2Ah3	22-70	0.44	-23.43	3.38	0.05	4.56	0.35	9.53	4.94	-23.28	11.42	0.52	9.53	1.20	9.52	
2AC	70-104	0.73	-23.13	5.82	0.07	6.54	0.53	10.88	5.77	-22.91	11.68	0.58	9.76	1.17	9.95	
3Ahb	104-125	0.52	-22.62	4.23	0.04	6.72	0.34	12.28	5.89	-21.92	11.42	0.58	9.91	1.12	10.16	
P6 - Cambic Someric Umbrisol (Pantoloamic, Humic, Panpaic)/CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico típico																
Ah	0-8	1.45	-24.22	12.98	0.11	6.14	0.96	13.57	7.75	-24.39	8.01	0.81	9.55	0.84	9.59	
2Ahb1	8-20	0.36	-20.89	3.11	0.02	6.67	0.21	14.79	4.78	-22.68	6.57	0.48	10.20	0.66	10.03	
3Ahb2	20-45	0.51	-23.26	3.68	0.03	6.89	0.20	18.71	2.99	-22.11	8.12	0.29	11.46	0.79	10.22	
4Ahb3	45-90	0.26	-24.29	1.79	0.02	7.37	0.14	12.49	2.45	-22.25	7.88	0.25	11.63	0.82	9.64	
5Bw	90-125	0.26	-23.66	1.52	0.03	9.18	0.17	9.07	1.52	-21.93	6.41	0.18	11.68	0.75	8.51	
P12 - Dystric Cambisol (Pantoloamic, Raptic)/CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico típico																
Ah1	0-5	1.77	-25.33	11.46	0.09	6.68	0.60	19.12	6.76	-25.02	23.70	0.57	9.91	2.01	11.82	
Ah2	5-40	0.62	-25.67	4.07	0.03	7.82	0.20	20.13	3.85	-24.39	13.08	0.38	10.99	1.28	10.21	
Bw1	40-65	0.51	-26.43	3.41	0.03	10.34	0.22	15.66	1.90	-23.45	6.33	0.22	13.84	0.73	8.73	
Continua																

Continua

Hor.	Prof. (cm)	C%	δ ¹³ C (‰)	C (mg g soil ⁻¹)	MOP			C/N ratio	MOAM					C/N ratio	Conclusão
					N%	δ ¹⁵ N (‰)	N (mg g soil ⁻¹)		C%	δ ¹³ C (‰)	C (mg g soil ⁻¹)	N%	δ ¹⁵ N (‰)		
2Bw2	65-82	0.30	-26.29	1.81	0.03	9.51	0.15	11.72	1.71	-23.18	6.81	0.19	12.61	0.77	8.81
P18 - Haplic Phaeozem (Pantloamic, Panpaic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico															
Ah1	0-10	3.98	-26.78	30.68	0.26	10.23	2.02	15.17	8.02	-24.97	18.43	0.71	12.77	1.63	11.28
Ah2	10-20	0.49	-26.43	3.54	0.03	11.55	0.21	16.49	3.02	-24.04	8.19	0.33	14.11	0.91	9.21
2Ahb	20-35	0.19	-26.79	1.47	0.01	10.56	0.08	18.99	1.97	-23.91	4.80	0.22	14.02	0.53	9.02
P21 - Eutric Leptosol (Loamic)/NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico															
Ap	0-20	0.21	-21.95	1.54	0.01	15.14	0.11	14.23	1.94	-18.63	5.09	0.23	16.25	0.60	8.45
Solos típicos da Caatinga															
P23 - Yermic Vertic Luvisol (Epiloamic, Clayic, Hypereutric, Epic)/LUVISSOLO CRÔMICO Órtico vertissólico															
A	0-10	0.10	-20.80	0.57	0.01	9.89	0.05	11.91	0.58	-20.52	2.47	0.09	11.24	0.39	6.36
P28 - Eutric Regosol (Epiloamic, Amphiarenic)/NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico léptico															
Ap	0-16	1.01	-20.50	8.64	0.09	14.67	0.80	10.83	3.41	-19.80	4.91	0.41	16.97	0.59	8.38
A	16-54	0.04	-25.18	0.30	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.66	-21.91	1.04	0.09	12.30	0.14	7.49
Hor.: Horizontes. Prof.: Profundidade. n.d.: Não detectado															

Na fração MOP, as assinaturas isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ variaram de -27,47 a -20,50‰, com uma variação de até 4,68‰ em P28, sendo observada com o aumento da profundidade do solo. A MOP dos horizontes superficiais dos perfis P1, P4 e P2 foram mais depletadas em ^{13}C com os valores de $\delta^{13}\text{C}$ mais negativos, -27,03, -26,54 e -26,45 ‰, respectivamente (Tabela 8). Contudo, as amostras mais enriquecidas em ^{13}C foram os horizontes superficiais dos solos típicos da Caatinga, P28 e P23 com $\delta^{13}\text{C}$ de -20,50 e -20,80‰ (média -24,47 ‰ $\pm$ 1,88), respectivamente. As assinaturas de $\delta^{15}\text{N}$ foram menores na MOP se comparadas a MOAM, evidenciando uma variação de 4,56 a 15,14 ‰. O perfil P12 apresentou a maior variação com o aumento da profundidade do solo, onde os valores elevaram-se até 10,34 ‰. As maiores assinaturas de $\delta^{15}\text{N}$ foram observadas nos horizontes superficiais dos perfis P21 (15,14 ‰) e P28 (14,67 ‰), respectivamente. O horizonte 2Ah3 do P4 foi o mais empobrecido em ^{15}N (4,56 ‰). Apenas o horizonte A do P28 com teores de N abaixo do detectável (< 0,001 ‰), impossibilitou a identificação da assinatura da amostra.

As assinaturas isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ da MOAM oscilaram de -26,47 a -23,61 ‰, com maior variação dentro do perfil P4 (4,11 ‰). A MOAM foi um pouco mais distinta que a MOP em termos do padrão de depleção de ^{13}C , apresentando um maior enriquecimento de $\delta^{13}\text{C}$. Assim como ocorreu na fração MOP, as assinaturas de ^{13}C mais depletadas foram dos horizontes superficiais dos perfis P1 (-26,47 ‰), P4 (-26,02 ‰) e P2 (-25,97 ‰). Os horizontes superficiais dos perfis P21 (-18,63 ‰) e P28 (-19,80 ‰) foram os mais enriquecidos $\delta^{13}\text{C}$ (Tabela 8). As assinaturas de $\delta^{15}\text{N}$ apresentaram uma oscilação menor do que na fração MOP, com valores variando de 7,19 ‰ no horizonte mais empobrecido em ^{15}N (Ah1 do P2) a 16,97 ‰ horizonte mais enriquecido em ^{15}N (Ah1 do P28). No geral, observou-se também que houve um pequeno enriquecimento de ^{13}C da fração MOP para a MOAM, com valores de $\delta^{13}\text{C}$ tornando-se menos negativos (Tabela 8).

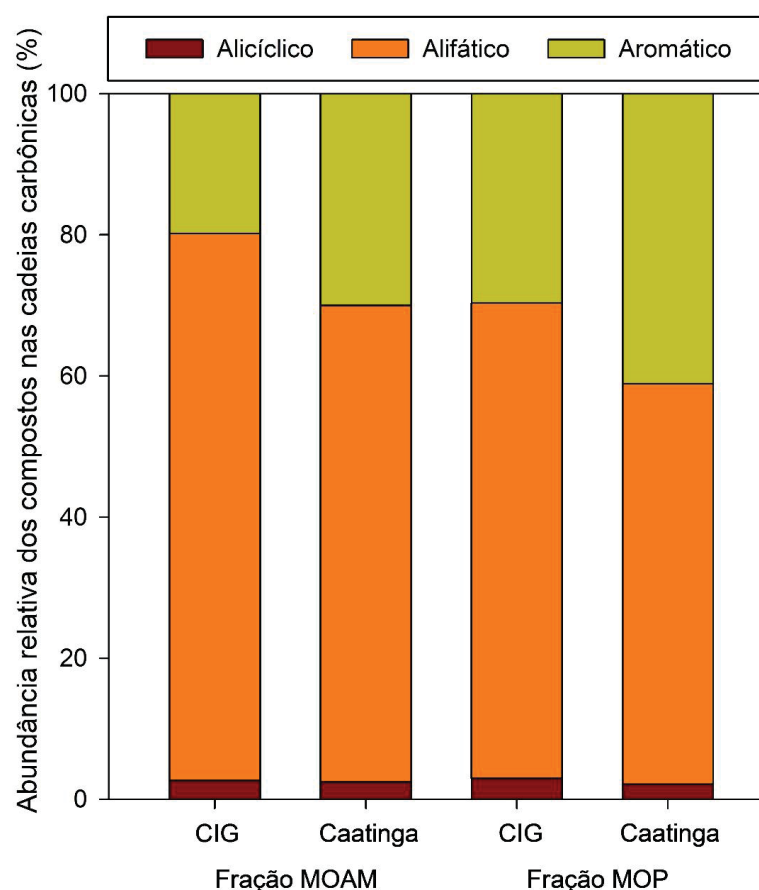
Em todo o conjunto de dados, as assinaturas isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ mostraram sobreposições para ambas as frações da MOS. No entanto, os valores de $\delta^{15}\text{N}$ foram os que mais variaram, indicando um maior enriquecimento de ^{15}N , para ambas as frações MOP e MOAM, com aumento da profundidade. $\delta^{15}\text{N}$ foi sempre maior na MOAM do que na respectiva MOP, indicando um avanço da humificação. Em relação ao $\delta^{13}\text{C}$, além da

oscilação nas assinaturas entre as frações, às vezes mais negativo, às vezes menos negativo, apresentaram um padrão diverso em profundidade nos perfis.

6.1.4.2 Composição bioquímica das frações de MOS

A análise da composição bioquímica das frações de MOS através da termoquimólise HTMA off-line permitiu a identificação de 234 compostos (APÊNDICE E). A estrutura das cadeias carbônicas dos compostos identificados nas frações da MOS, em geral, indicou predominância de compostos alifáticos (Figura 23).

FIGURA 23 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS CADEIAS CARBÔNICAS DAS AMOSTRAS DE MOAM E MOP NO CONTEXTO DOS SOLOS SITUADOS NO CIG E NA CAATINGA TÍPICA.



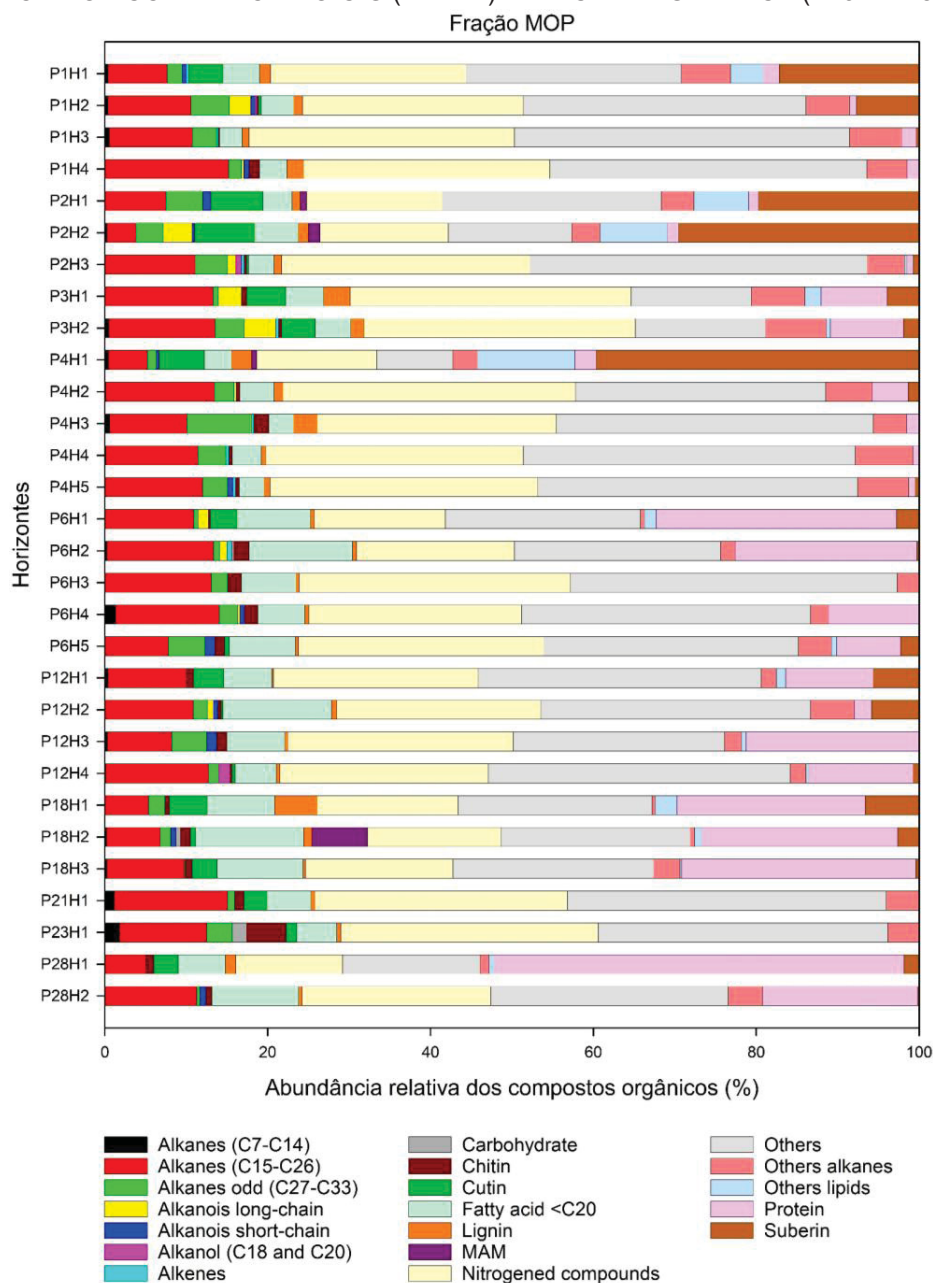
FONTE: Elaboração própria (2025).

Nas frações MOAM e MOP, os compostos alifáticos se apresentaram relativamente mais abundantes no CIG (77,5% em MOAM e 67,4% em MOP) do que na Caatinga mais típica (67,5% em MOAM e 56,8% em MOP). No caso dos compostos aromáticos, em ambas as frações, observa-se uma maior percentagem relativa na Caatinga (30% em MOAM e 41,1% em MOP). Compostos com cadeias alicíclicas foram mais restritos e menos abundantes em todos os contextos paisagísticos, limitados a $\pm 3\%$ da abundância relativa quando comparados aos alifáticos e aromáticos.

Em relação a possível origem dos compostos orgânicos, a fração MOP apresentou a maior diversidade de compostos (27,4%), com destaque a predominância de compostos nitrogenados (Nitrogenated compounds e Protein), representando cerca de 34 e 45,8%, da abundância relativa no CIG e na Caatinga típica, respectivamente (Figura 24). Além disso, esses compostos aumentam com a profundidade. Compostos que não se enquadraram no sistema de classificação previamente estabelecido, foram agrupados em Others e correspondem, respectivamente, a 30,1 e 27,2% da composição molecular relativa da MOP para CIG e Caatinga típica. O terceiro grupo de compostos mais comum na MOP foram os alcanos (16,9% no CIG e 13,8% na Caatinga típica).

O grupo de compostos de origem lipídica, como a suberina, cutina e os ácidos graxos (Fatty acid $<C_{20}$) tendem a reduzir em profundidade e juntos compõem cerca de 15,1 e 9,4%, respectivamente, da composição molecular relativa do CIG e da Caatinga típica. Os demais grupos de compostos, somados, não ultrapassam os 4% (Figura 24).

FIGURA 24 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DA COMPOSIÇÃO MOLECULAR DAS AMOSTRAS DE MOP NOS CONTEXTOS DO CIG (P1-P21) E DA CAATINGA TÍPICA (P23 E P28).

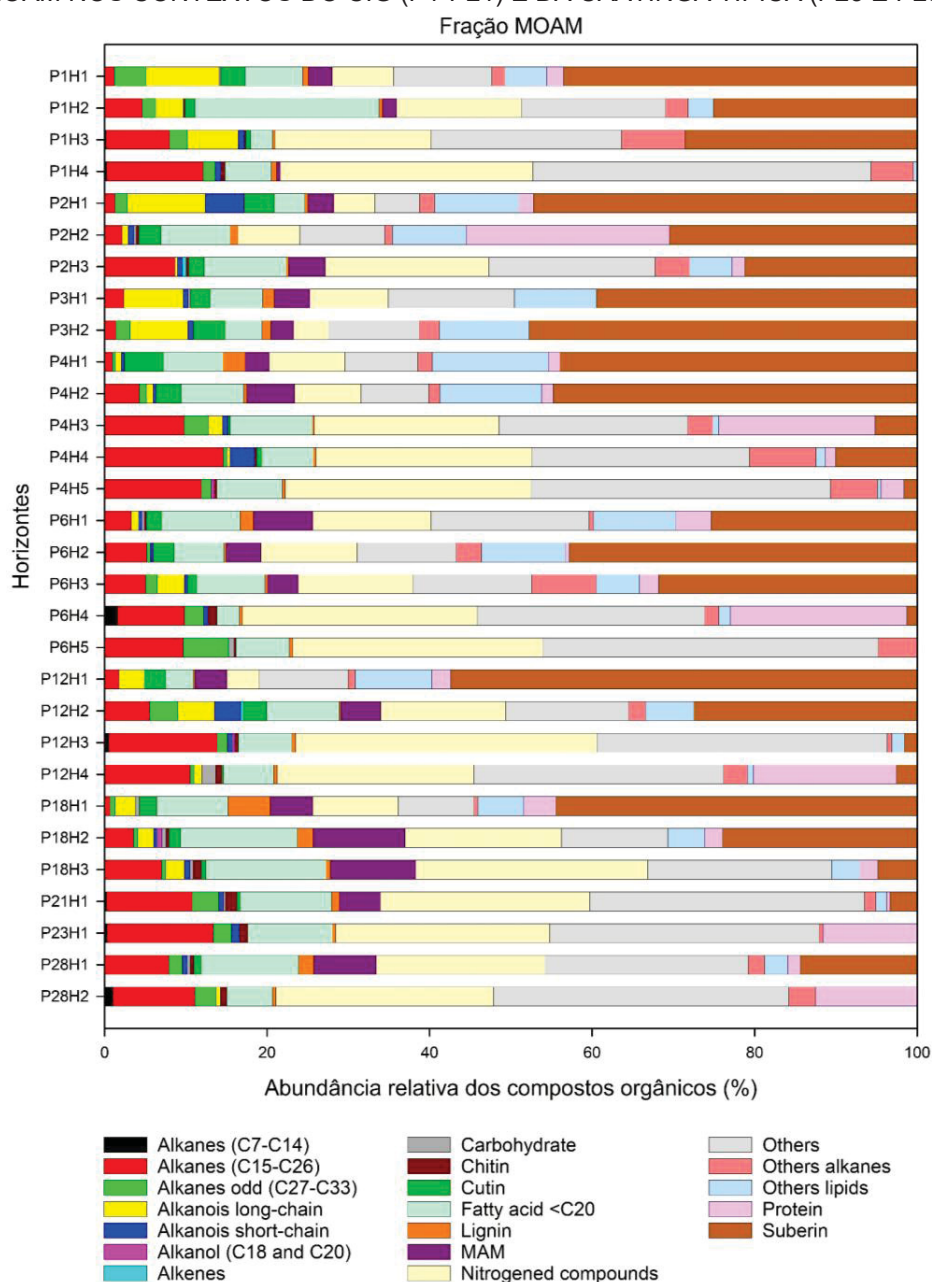


FONTE: Elaboração própria (2025).

A fração MOAM, apresentou predominância de compostos lipídicos (CIG – 39,3% e Caatinga – 15,4%), e compostos nitrogenados (CIG – 22,1% e Caatinga – 33,2%). Dos compostos lipídicos, a suberina teve maior porcentagem de contribuição, contando com 24,3% no CIG e 4,8% na Caatinga típica, além disso, prevaleceu nas amostras do CIG,

sendo mais abundante nos horizontes superficiais, reduzindo conforme aumento da profundidade (Figura 25). O contrário é observado para os compostos nitrogenados, que semelhante ao que foi constatado na fração MOP, enriquecem com a profundidade, embora em menor proporção nos dois contextos paisagísticos.

FIGURA 25 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DA COMPOSIÇÃO MOLECULAR DAS AMOSTRAS DE MOAM NOS CONTEXTOS DO CIG (P1-P21) E DA CAATINGA TÍPICA (P23 E P28).



FONTE: Elaboração própria (2025).

Compostos classificados como Others representam o terceiro grupo de maior abundância na fração MOAM (CIG – 20,3% e Caatinga - 31,5%). Este grupo é seguido pelos alcanos que juntos representam cerca de 10,4 e 14,9% da composição molecular no CIG e Caatinga, respectivamente. Quanto aos marcadores de atividade microbiana (MAM), observou-se maior presença na fração MOAM (CIG – 3,2% e Caatinga - 2,6%) do que no MOP (CIG – 0,4%). O grupo MAM foi concentrado em apenas um marcador entre os ácidos graxos, sendo o Methyl stearate considerado como proxies para atividade microbiana (Tadini *et al.*, 2022).

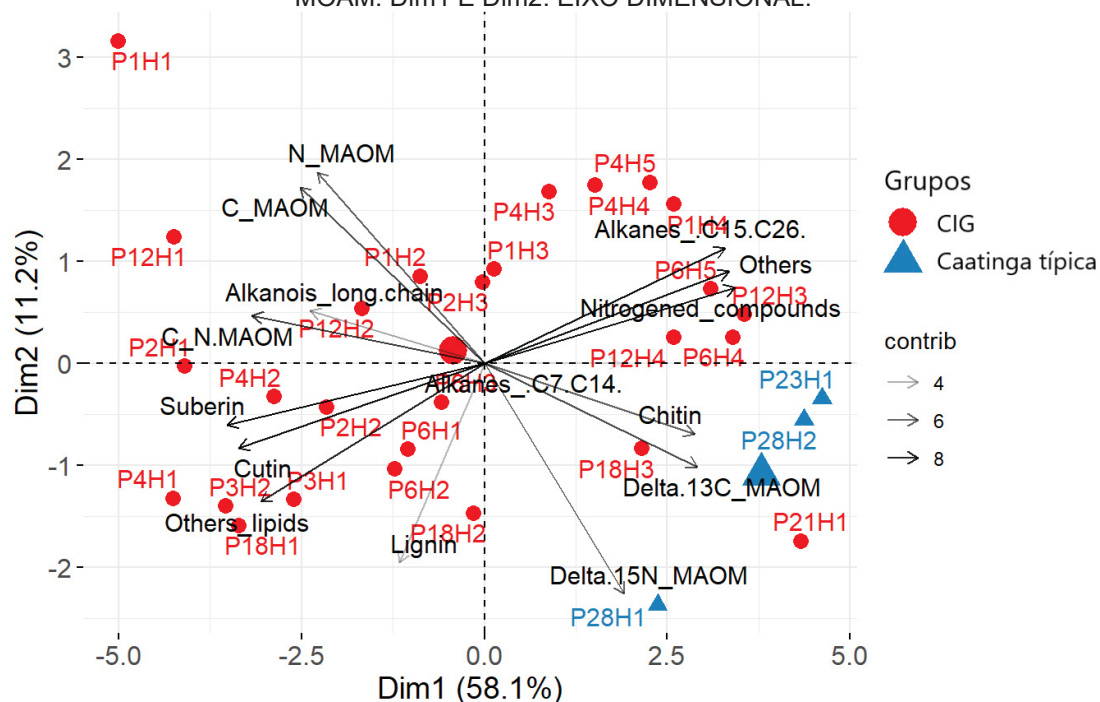
6.1.4.3 PCA

Devido à grande variação em termos de contribuição das variáveis estudadas, foram realizadas duas análises de componentes principais (PCA) para analisar o comportamento das variáveis relacionadas a composição molecular da MOS, os teores de C e N e suas respectivas assinaturas isotópicas (Figuras 26 e 27). As PCAs indicaram quais grupos de compostos estavam mais relacionados às demais variáveis e quais grupos de compostos continham mais informações para distinguir a qualidade da MOS nos diferentes contextos paisagísticos do CIG e da Caatinga típica.

A PCA da fração MOP apresentou duas dimensões principais, respondendo por 63,6% da variação total dos dados. A Dim1 contou com 46,2% enquanto a Dim2 ficou com 17,4% da variância. Os compostos lipídicos do MOP, classificados como Other lipids, suberina e cutina estão negativamente correlacionados com a Dim1 ($r = 0,90$, $0,88$ e $0,83$, respectivamente). Os níveis de C e N seguiram o mesmo padrão estando no mesmo quadrante de dispersão, apresentando correlação negativa com o Dim1 (ambos com $r = 0,82$). Essa tendência também foi observada para os compostos derivados da lignina, entretanto, em menor proporção ($r = 0,40$). Os grupos de compostos alcanos ($C_{15} - C_{26}$), Others e nitrogenados foram positivamente correlacionados com o Dim1 ($r = -0,73$, $-0,68$ e $-0,67$, respectivamente). Carboidratos, quitina, alcanos ($C_7 - C_{14}$) e a assinatura isotópica de $\delta^{13}C$ compõem a Dim2, e foram positivamente correlacionados ($r = 0,85$, $0,74$, $0,74$ e $0,37$, respectivamente) (Figura 26).

com o Dim1 ($r = -0,79$, $-0,78$ e $-0,50$, respectivamente). Enquanto a Dim2 é basicamente composta pela assinatura isotópica de $\delta^{15}\text{N}$ e derivados de lignina ($r = 0,61$ e $0,52$).

FIGURA 27 - ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS INDICANDO A SEPARAÇÃO DOS GRUPOS DE SOLOS DE ACORDO COM A COMPOSIÇÃO BIOQUÍMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO, OS TEORES DE C E N E SUAS RESPECTIVAS ASSINATURAS ISOTÓPICAS DA FRAÇÃO MOAM. Dim1 E Dim2: EIXO DIMENSIONAL.



FONTE: Elaboração própria (2025).

6.1.5 Discussão

6.1.5.1 Teores de C, N e relação C/N nas frações de MOS

Os maiores teores de C e N associados a fração MOAM sugerem que essa fração é um reservatório mais estável de MOS, isso provavelmente está atrelado a sua maior humificação em relação a MOP, e conseqüentemente, a associação com os minerais do solo que protegem e/ou reduzem a capacidade da comunidade microbiana em decompor esses elementos (Lavellee *et al.*, 2020; Manzone; Cotrufo, 2024; Yu *et al.*, 2022). Algo contrário ocorre na fração MOP, onde seus menores teores de C (12,17 - 0,04%) e N (0,84 - 0,01%), podem ser explicados conforme sua composição, basicamente de restos

vegetais e/ou animais pouco decompostos (mais lábeis), que tendem a ser mais susceptível à degradação (Leuthold *et al.*, 2024).

A diminuição dos teores de C e N com o aumento da profundidade dos solos, independente do contexto paisagístico e da fração da MOS, podem indicar que não exista uma diferença tão significativa na atividade microbiana entre os horizontes superficiais e subsuperficiais, além da redução de aporte vegetal nos horizontes superficiais. Diferentemente do que ocorre para a maioria dos ambientes, onde o principal impulsionador da atividade microbiana é a distribuição vertical de C (Gao *et al.*, 2022; Liang *et al.*, 2024), concentrando-se nos horizontes superficiais, acredita-se que na Caatinga os fatores climáticos sejam atenuadores desse padrão, e superem a redução progressiva de C e N em profundidade (Tabela 8). Temperaturas elevadas e consequente redução da disponibilidade hídrica tendem a restringir o aporte de resíduos orgânicos e a atividade microbiana próximo a superfície (Holanda *et al.*, 2017; Jia *et al.*, 2019), induzindo as comunidades microbianas a atuarem nos horizontes mais profundos, mais isolados das condições climática estressantes em superfície (Dove *et al.*, 2021).

Ademais, propriedades físico-químicas do solo como o pH e a textura podem corroborar para essa dinâmica. Sob condições de maior acidez, oligotrofia, como no caso dos horizontes mais profundos em comparação aos superficiais dos solos no CIG (Tabela 7), é possível que os minerais e os nutrientes se tornem mais solúveis, favorecendo sua disponibilidade (Adingo *et al.*, 2021; Ferrarezi *et al.*, 2022). Somados a isso, a predominância da areia grossa em sua textura favorece o fluxo de C lábil e melhora a aeração, permitindo o desenvolvimento e manutenção das comunidades microbianas (Xia; Ruffy; Shi, 2020). Essa combinação tende a reduzir as limitações do crescimento microbiano e a inibição do processamento do C (Liang *et al.*, 2024).

As exceções no padrão de decréscimo nos teores de C e N em profundidade, foram observadas nos horizontes enterrados nos perfis P1, P4 e P6 situados no CIG (Tabela 8), provavelmente associadas à dinâmica sazonal de precipitação e erosão característicos da Caatinga e sua posição topográfica mais rebaixada. Nessa região, as chuvas são irregularmente distribuídas no tempo e no espaço e tendem a ser intensas com elevada capacidade de remoção e transporte de sedimentos (Borges Neto *et al.*, 2023; Xavier, 2021). Os pulsos de precipitação ao entrarem diretamente em contato com

a superfície da rocha das encostas dos inselbergs, por gravidade escoam transportando sedimentos e resíduos biogênico para áreas mais rebaixadas (toeslope) ou que forneçam feições típicas de acumulação (gnammas) possibilitando o soterramento dos horizontes até então superficiais (Capítulo anterior, item 5). Com o soterramento, a MOS desses horizontes passa a ser isolada da oxidação, resistindo por mais tempo no solo.

Teores de C e N nas frações de MOP e MOAM mais elevados nos solos do CIG em relação aos solos da Caatinga típica podem ser atribuídos à maior disponibilidade hídrica nos bolsões de solo encontrados próximos ou inseridos nas encostas rochosas dos inselbergs. Nesses ambientes, a umidade tende a ser maior e permanecer por mais tempo, favorecendo a ocorrência de espécies vegetais mais sensíveis ao estresse hídrico e pertencentes a biomas mais úmidos quando comparado a Caatinga (APÊNDICE B; Capítulo anterior, item 5; Salvador *et al.*, 2023). Neste contexto, é pertinente considerar que a produção de resíduos vegetais seja mais pronunciada, possibilitando maior aporte de matéria-prima à MOS (Capítulos anteriores, itens 4 e 5, ex. Figura 12). No contexto típico da Caatinga, existe um padrão bem delineado, onde sua exposição a semiaridez severa associada ao longo histórico de uso e ocupação degradante desta região, condiciona a ocorrência de fragmentos vegetais mais esparsos e de menor porte (Souza *et al.*, 2015; Souza; Souza, 2016). Neste cenário, existe a tendência de redução na entrada de resíduos orgânicos para o solo, e o pouco que é aportado, ainda passa por uma mineralização acelerada (Celaya-Michel *et al.*, 2011; Sandras; Baldock, 2003).

No que se refere a relação C/N, valores mais baixos encontrados na MOAM (11,82 - 8,45 no CIG e 8,38 - 6,36 na Caatinga típica) em comparação com a MOP (20,13 - 9,07 no CIG e $\leq 11,91$ na Caatinga típica) sugerem que a MOAM é provavelmente composta por material mais humificado, enriquecido em N microbiano - mais estável (Cotrufo *et al.*, 2019; Kögel-Knabner *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2022). Esse resultado se alinha com a grande contribuição na abundância relativa de compostos nitrogenados encontrados via HTMA GC/MS na fração MOAM (Figura 25), que será discutida com maior detalhe no tópico seguinte (item 6.1.5.2). Em síntese, os microrganismos assimilam C lábil derivado da MOP e liberam compostos nitrogenados, que se ligam aos minerais, dando origem a MOAM (Cotrufo *et al.*, 2019; Manzoni; Cotrufo, 2024). Esse processo condiciona a

redução da relação C/N na MOAM, pois o C é perdido durante a respiração microbiana como CO₂, enquanto o N é retido (Hendrickson, 1985).

6.1.5.2 Caracterização bioquímica das frações de MOS

A compreensão sobre os possíveis mecanismos responsáveis pela persistência do C no solo, tem despertado grande interesse recentemente, devido sua relevância para o entendimento do ciclo global de C (Locatelli *et al.*, 2025; Willard *et al.*, 2024). A detecção da diversidade de compostos bioquímicos nas diferentes frações de MOS, se torna essencial para identificar a complexidade e maior estabilidade da MOS (Jones *et al.*, 2023), principalmente para o caso da Caatinga, em virtude da ausência de informações/dados disponíveis (Primo *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2025).

A comparação entre os dois contextos paisagísticos revela que a persistência da MOS no CIG é basicamente controlada pela sinergia de três mecanismos: i) proteção física via associação organo-mineral, que preserva compostos alifáticos e necromassa microbiana; ii) recalcitrância química de lipídios (hidrofobicidade); e iii) ciclagem microbiana eficiente, que converte MOP lábil em MOAM estável.

Na Caatinga típica, a escassez hídrica e a exposição solar intensa limitam a entrada de novos resíduos e aceleram a perda de C labial (Austin; Vivanco, 2006; Costa, 2016). Dessa forma, é provável que a MOS residual, estruturalmente mais oxidada, apresente maior presença de grupos carboxílicos. Esses grupos, apesar de aumentar a reatividade da MOS, podem reduzir sua susceptibilidade à decomposição microbiana, possibilitando a persistência de compostos mais recalcitrantes, como os aromáticos (Figura 23).

A análise via HTMA/GC-MS das frações de MOS no CIG e na Caatinga típica revela uma complexa interação entre a composição bioquímica da MO, a atividade microbiana e as condições pedoclimáticas. Nos solos do CIG, a predominância na abundância relativa de compostos alifáticos (77,5% na MOAM e 67,4% na MOP) – como ceras, cutina e suberina – são provavelmente derivados de tecidos vegetais frescos e raízes (Figuras 24 e 25). Esses compostos, são fundamentais para a estabilização da MOS em solos com reduzidos teores de argila (Andreetta *et al.*, 2013), devido à sua

natureza hidrofóbica e recalcitrância química. Esses lipídios estruturais (ex. suberina e cutina), comuns em plantas vasculares, funcionalmente atuam como barreiras para evitar a perda de água e resistem à decomposição devido sua complexidade molecular, incluindo cadeias alifáticas entrelaçadas e grupos ésteres hidrofóbicos (Andreetta *et al.*, 2013), que limitam o acesso de enzimas hidrolíticas (Oliveira *et al.*, 2006). Além disso, como exemplo, a suberina que representou 24,3% da abundância relativa dos lipídios na MOAM do CIG, também pode ser preservada pelo encapsulamento em agregados estáveis (Dignac *et al.*, 2017).

Estudos em solos sob florestas mediterrâneas, com teores de argila ($\leq 5,8\%$), C ($\leq 104,7 \text{ mg g}^{-1}$) e N ($\leq 6,3 \text{ mg g}^{-1}$) relativamente similares aos deste estudo (Tabela 8), demonstram que grupos de compostos lipídicos (ex. cutina e suberina), mesmo sem proteção e/ou associação aos minerais do solo, foram preservados preferencialmente em relação a outros grupos de compostos orgânicos, como a lignina, muito por conta da sua resistência termodinâmica e hidrofobicidade (Andreetta *et al.*, 2013).

Entretanto, sob condições mais úmidas, como na floresta tropical de montanha dos Andes no sul do Equador, o papel da fase mineral na estabilização da MOS ganha maior destaque em relação à recalcitrância química (Hamer *et al.*, 2012). Solos sob diferentes usos apresentaram teores de C e argila na ordem de 87,4 e 217 g kg⁻¹ em floresta tropical, de 93,4 e 337 g kg⁻¹ em pastagem (20 anos), e de 81,1 e 288 g kg⁻¹ em pastagem abandonada, respectivamente, superiores aos desta pesquisa (Tabela 8), e foi sugerido que a estabilidade de alguns monômeros alifáticos da fração lipídica (suberina e cutina) foram identificadas após a mudança do uso da terra de floresta para pastagem, concomitantemente com a baixa estabilidade dos mesmos monômeros após o abandono da pastagem (Hamer *et al.*, 2012). Nesse contexto apresentado por Hamer *et al.* (2012), elevadas temperaturas associadas a maior disponibilidade de umidade favorecem a atividade microbiana, e consequentemente reduzem a importância da recalcitrância química na proteção da MOS ao longo das interferências antrópicas. Então, a persistência da MOS tende a seguir outros caminhos, como o da interação organo-mineral mediada pela adsorção em argilominerais ou a formação de complexos com Al³⁺/Fe³⁺ (Carvalho *et al.*, 2023; Hanke; Dick, 2020; Six *et al.*, 2022).

Para o caso da Caatinga típica, a menor abundância relativa de compostos alifáticos (MOAM - 67,5% e MOP - 56,8%) em relação aos compostos aromáticos (MOAM - 30% e MOP - 41,1%), sugerem um cenário de MOS mais estável estruturalmente, pois a exposição prolongada à radiação solar e à escassez hídrica promovem a oxidação de compostos lábeis (Almagro *et al.*, 2017; Austin; Vivanco, 2006). Aromaticidade relativamente mais elevada, frequentemente associada a polímeros condensados derivados da lignina ou a subprodutos da pirólise de biomassa (efeito antrópico), indica uma maior estabilidade termodinâmica da MOS (Cotrufo *et al.*, 2019). Esse padrão parece ser recorrente em ecossistemas secos, onde a degradação física (ex. erosão) e química (ex. fotodegradação) superam os mecanismos de proteção biológica, resultando em perdas progressivas de C orgânico (Austin; Vivanco, 2006; Hussain *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2023).

A abundância relativa de compostos nitrogenados na MOP em ambos os contextos paisagísticos (CIG - 34% e Caatinga típica - 45,8%) evidenciam a importância da ciclagem microbiana na dinâmica da MOS. Na Caatinga típica, sua maior proporção está ligada a estratégias de conservação de N em solos pobres neste elemento, onde microrganismos imobilizam N em biomassa ou enzimas extracelulares, formando complexos orgânicos que resistem à mineralização imediata (Austin, 2011; Austin; Vivanco, 2006). O aumento desses compostos com a profundidade, tanto na MOP quanto na MOAM, indica um transporte vertical de compostos com N em sua estrutura parcialmente decomposta, possivelmente mediado pela fauna do solo ou lixiviação limitada. Na MOAM, os compostos nitrogenados (CIG - 22,1%; Caatinga - 33,2%) são provavelmente derivados de necromassa microbiana, um reservatório importante de N em solos tropicais onde a fixação biológica é esporádica (Albuquerque *et al.*, 2025; Kögel-Knabner *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2022). Esse achado sugere que os compostos portadores de N presentes na MOAM podem se originar de atividades microbianas que requerem N, ligando assim a capacidade dos solos de armazenar C à disponibilidade de N (Cotrufo *et al.*, 2019; Primo *et al.*, 2024).

Os marcadores de atividade microbiana (MAM), como o *Methyl stearate*, são mais abundantes na MOAM (CIG - 3,2% e Caatinga - 2,6%) do que na MOP (CIG - 0,4%), evidenciando que a biomassa microbiana morta é um componente fundamental da MOS

estável (Cotrufo *et al.*, 2019; Lavellee *et al.*, 2020; Manzone; Cotrufo, 2024). Microrganismos contribuem para a MOAM através de subprodutos metabólicos (ex. exopolissacarídeos) e necromassa, que se adsorvem a minerais ou são encapsulados em microagregados (Dignac *et al.*, 2017; Liang *et al.*, 2019). É provável que no CIG, a maior umidade do solo favoreça a atividade microbiana, permitindo que esses compostos se acumulem (Liang *et al.*, 2017), enquanto na Caatinga típica, a semiaridez dificulta a produção de biomassa, reduzindo sua contribuição relativa (Silva *et al.*, 2024).

A abundância relativamente alta de grupos de compostos alifáticos e necromassa microbiana (compostos nitrogenados) também sugere que a MOS pode ser estabilizada via associação organo-mineral (Heckman *et al.*, 2018). Mesmo com solos predominantemente arenosos (média da fração areia grossa somada a areia fina = 66,2%), teores médios de argila de 20,8% foram observados nos solos do CIG (Tabela 8). Neste contexto, é muito provável que a superfície das argilas promova o acúmulo de C e N derivados de atividade microbiana, pois fornecem mais sítios de ligação para os compostos orgânicos (Rempfert *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2025). Além disso, a menor relação C/N observada na fração MOAM (média de 10,12) se assemelha à observada na biomassa microbiana (Fang *et al.*, 2022).

Esses achados têm implicações diretas para o manejo sustentável em cenários de mudanças climáticas. O aumento da temperatura e a redução de chuvas projetadas para o semiárido podem exacerbar a degradação da MOS na Caatinga, acelerando perdas de C e reduzindo sua resiliência (Borah; Parmar, 2024; IPCC, 2013; Macedo *et al.*, 2023). Em relação ao CIG, a manutenção da vegetação nativa é indispensável para preservar os mecanismos de proteção físico-químicos e garantir a continuidade do aporte de resíduos alifáticos e hidrofóbicos. Portanto, a MOS em ambientes semiáridos não pode ser considerada apenas um reservatório de C, mas um termômetro da saúde do ecossistema, pois em um cenário de mudanças climáticas, onde a aridez tende a aumentar, a compreensão desses mecanismos alternativos que contribuem para sua persistência se torna indispensável para elaboração de estratégias efetivas de sequestro de C nesses solos (Lourenço *et al.*, 2022; Qiu *et al.*, 2023).

6.5.1.3 Assinaturas isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ das frações de MOS

A assinaturas de $\delta^{13}\text{C}$ variando entre -27,47 e -20,50‰ na MOP dos solos no CIG, confirmam a dominância de plantas C_3 , adaptadas a condições microclimáticas em bolsões de solo, próximas ou inseridas nas encostas rochosas (Capítulo anterior, item 5), menos estressante que as observadas na Caatinga típica (Tabela 8). O enriquecimento de $\delta^{13}\text{C}$ com a profundidade (ex. + 4,68‰ no P28) na MOP reflete a decomposição preferencial de ^{12}C por microrganismos, deixando a MOS residual enriquecida em ^{13}C (Liang *et al.*, 2017). Em relação a MOAM, a variação de $\delta^{13}\text{C}$ (-26,47 a -23,61‰) não se diferem tanto em relação a MOP, indicando que ambas as frações compartilham fontes e/ou processos de transformação semelhantes (Haddix *et al.*, 2016). No caso da MOAM, é possível que a estabilização esteja atrelada a capacidade de associação com os minerais do solo, minimizando a decomposição adicional, e com isso preserva a assinatura isotópica por períodos mais longos (Kleber *et al.*, 2015; Lugato *et al.*, 2021).

A presença de $\delta^{13}\text{C}$ enriquecido (-18,63‰) no perfil P21 na fração MOAM, indica uma transição para vegetação C_4 , característica de ambientes secos. A ausência de aporte hídrico direto das encostas rochosas neste perfil (≥ 40 m de distância) e sua menor profundidade (20 cm), favorecem a colonização de espécies C_4 , cuja o aporte de resíduos orgânicos são menores e mais resistentes à decomposição, evidenciando certa semelhança com o contexto típico da Caatinga.

O empobrecimento de $\delta^{15}\text{N}$ no horizonte 2Ah3 do P4 (4,56‰) na fração MOP, pode indicar fixação biológica de N_2 por bactérias associadas a leguminosas (Fabaceae), como *Enterolobium contortisiliquum*, *Erythrina velutina* e *Senna martiana* identificadas no local (APÊNDICE B). Esse processo é recorrente em solos jovens com baixa disponibilidade de N inorgânico (Houlton *et al.*, 2008). Cabe ressaltar que a impossibilidade de medir $\delta^{15}\text{N}$ no horizonte A do P28 ($\text{N} < 0,001\%$) reflete a extrema pobreza em N, típica de solos de ambientes quentes e secos, onde a MOS reduzida, dificulta a dinâmica dos processos biogeoquímicos (Austin, 2011; Menezes *et al.*, 2012).

A sobreposição de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ entre MOP e MOAM sugere que ambas as frações compartilham fontes primárias oriundas de vegetação com ciclo fotossintético do tipo C_3 , entretanto diferem conforme estágios de decomposição. A maior variabilidade de $\delta^{15}\text{N}$ na

MOP resalta sua natureza lábil, sujeita a ciclos mais rápidos de mineralização-imobilização, enquanto a MOAM com valores sempre mais elevados (Tabela 8), indica uma MOS mais trabalhada e humificada, ou seja, um pool mais estável (Lavellee *et al.*, 2020; Manzone; Cotrufo, 2024). Além disso, na MOAM, o N também pode ser protegido em complexos organo-minerais, elevando ainda mais a importância à sua persistência (Kleber *et al.*, 2015).

6.1.6 Considerações Finais

Mecanismos distintos que contribuem para a persistência da MOS foram observados entre os solos do CIG e os típicos da Caatinga. No CIG, a proteção da MOS parece estar associada a sinergia de mecanismos de proteção via associação organo-mineral, hidrofobicidade e eficiência microbiana na ciclagem que converte o MOP mais lábil em MOAM relativamente mais estável. Enquanto nos solos típicos da Caatinga, a persistência da MOS, provavelmente é derivada da maior oxidação e aromaticidade de sua composição molecular. Esses mecanismos divergem dos observados em outros ecossistemas secos, pois a proteção dos minerais e a recalcitrância química são menos proeminentes em solos arenosos, além da menor eficiência da ciclagem microbiana frequentemente relatada em ambientes sob condições de estresse hídrico extremo.

A hipótese inicial de que a qualidade da MOS seria o principal mecanismo para sua persistência foi parcialmente atendida. Contudo, resalta-se que na Caatinga típica, a degradação física e química supera os mecanismos biológicos de proteção da MOS. Alerta-se para a necessidade de preservar a cobertura vegetal nativa, devido sua capacidade em aportar resíduos orgânicos alifáticos e hidrofóbicos nos solos do CIG, enquanto na Caatinga típica, práticas agrícolas conservacionistas precisam levar em conta a dinâmica erosiva, para mitigar as perdas de C. A dominância de espécies C_3 no CIG e a transição para C_4 em áreas mais secas sugerem adaptações vegetais a condições microclimáticas nos bolsões de solos dos inselbergs, relevantes para manutenção de refúgios, úteis para estudos de reconstrução paleoambiental. Estoques de C na fração MOAM nos solos do CIG representam um reservatório resiliente sob a

proxies das mudanças climáticas, mas a MOS oxidada das áreas de Caatinga típica urgem por estratégias eficientes no sequestro de C.

Estudos futuros devem se concentrar em entender melhor a heterogeneidade topográfica que rege o ciclo da água, fator mais limitante desse ecossistema, e uma caracterização mais detalhada da atividade microbiana de enzimas associadas à decomposição, ajudariam a melhorar a compreensão dos processos responsáveis pela formação da fração MOAM. Além disso, seria importante a integração de dados mineralógicos mais detalhados (ex. espectroscopia de raios-X) para auxiliar no entendimento das interações organo-minerais.

6.1.7 Referências

ADINGO, S.; YU, J.; XUELU, L.; LI, X.; JING, S.; XIAONG, Z. Variation of soil microbial carbon use efficiency (CUE) and its Influence mechanism in the context of global environmental change: a review. **PeerJ**, v. 9, e12131, 2021. <http://doi.org/10.7717/peerj.12131>.

ALBUQUERQUE, A. S.; FREIRE, F. J.; LEITE, M. J. H.; MELO, F. F.; FREIRE, C. S.; MARQUES, P. R. D.; PINTO, A. V. F.; MORAIS, Y. Y. G. A. Carbono e nitrogênio do solo em área de Floresta Tropical Seca no Nordeste Brasileiro. **Caderno Pedagógico**, v. 22, n. 1, p. e13389-e13389, 2025. <https://doi.org/10.54033/cadpedv22n1-158>.

ALMAGRO, M.; MARTÍNEZ-LÓPEZ, J.; MAESTRE, F. T.; REY, A. The contribution of photodegradation to litter decomposition in semiarid Mediterranean grasslands depends on its interaction with local humidity conditions, litter quality and position. **Ecosystems**, v. 20, p. 527-542, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-0036-5>.

ANDREETTA, A.; DIGNAC, M. F.; CARNICELLI, S. Biological and physico-chemical processes influence cutin and suberin biomarker distribution in two Mediterranean forest soil profiles. **Biogeochemistry**, v. 112, n. 1, p. 41-58, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9693-9>.

ANGST, G.; MUELLER, K. E.; NIEROP, K. G.; SIMPSON, M. J. Plant-or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 156, p. 108189, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108189>.

ARAÚJO FILHO, J. C.; CORREA, M. M.; PAIVA, A. Q.; COSTA, O. V.; VALLADARES, G. S.; RIBEIRO, M. R.; SCHAEFER, C. E. G. R. Semi-arid Soils of the Caatinga Biome of Northeastern Brazil. In: **The Soils of Brazil**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 175-193. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19949-3_6.

AUSTIN, A. T. Has water limited our imagination for aridland biogeochemistry?. **Trends in ecology & evolution**, v. 26, n. 5, p. 229-235, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.02.003>.

AUSTIN, A.; VIVANCO, L. Plant litter decomposition in a semi-arid ecosystem controlled by photodegradation. **Nature**, v. 442, n. 7102, p. 555-558, 2006. <https://doi.org/10.1038/nature05038>.

BORAH, B.; PARMAR, P. Soil Organic Carbon Dynamics: Drivers of Climate Change-Induced Soil Organic Carbon Loss at Various Ecosystems. **International Journal of Environment and Climate Change**, v. 14, p. 153-174, 2024. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2024/v14i104477>.

BORGES NETO, I. O.; XAVIER, R. A.; SOUZA, B. I.; SANTOS, L. J. C.; SOARES, D. A.; SOUZA, J. J. L. L.; Preliminary experimental data on surface runoff and soil loss in the Caatinga. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 48, n. 9, p. 1712-1723, 2023. <https://doi.org/10.1002/esp.5581>.

BURKE, A. Properties of soil pockets on arid Nama Karoo inselbergs—the effect of geology and derived landforms. **Journal of Arid Environments**, v. 50, n. 2, p. 219-234, 2002. <https://doi.org/10.1006/jare.2001.0907>.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E.T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil science society of America journal**, v. 56, n. 3, p. 777-783, 1992. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>.

CARVALHO, M. L.; MACIEL, V. F.; BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L. N.; FERREIRA, T. O.; CERRI, C. E. P.; CHERUBIN, M. R. Stabilization of organic matter in soils: drivers, mechanisms, and analytical tools—a literature review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, p. e0230130, 2023. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220130>.

CELAYA-MICHEL, Hernán; CASTELLANOS-VILLEGAS, Alejandro E. Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. **Terra Latinoamericana**, v. 29, n. 3, p. 343-356, 2011.

CHEFETZ, B.; CHEN, Y.; CLAPP, C. E.; HATCHER, P. G. Characterization of organic matter in soils by thermochemolysis using tetramethylammonium hydroxide (TMAH). **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 2, p. 583-589, 2000. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642583x>.

CHEN, X.; NI, X.; ZHENG, G.; HU, M.; CHEN, H. Y. H. Changes in plant lignin components and microbial necromass matter with subtropical forest restoration. **Geoderma**, v. 445, 116875, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116875>.

CLARK-IOANNOU, S. M.; WARDELL-JOHNSON, G. W.; MILLETT, J. Multi-scale biogeographic controls over plant communities on granite outcrops in the Southwest

Australian Floristic Region. **Austral Ecology**, v. 46, n. 4, p. 627-639, 2021. <https://doi.org/10.1111/aec.13018>.

COSTA, U. O. **Efeitos da precipitação e da exposição à radiação solar na decomposição da serrapilheira em um ecossistema no semiárido brasileiro**. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (PPGE-UFRN), Natal-RN, 2016, 98 p. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/22232>.

COTRUFO, M. F.; RANALLI, M. G.; HADDIX, M. L.; SIX, J.; LUGATO, E. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. **Nature Geoscience**, v. 12, n. 12, p. 989-994, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6>.

DCA-UFCG. **Precipitação Mensal do Estado da Paraíba: 1911/1990**. Departamento de Ciências Atmosféricas/Universidade Federal de Campina Grande, 2020.

DEL RIO, J. C.; MCKINNEY, D. E.; KNICKER, H.; NANNY, M. A.; MINARD, R. D.; HATCHER, P. G. Structural characterization of bio-and geo-macromolecules by off-line thermochemolysis with tetramethylammonium hydroxide. **Journal of Chromatography A**, v. 823, n. 1-2, p. 433-448, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(98\)00268-4](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(98)00268-4).

DICK, D. P.; GONÇALVES, C. N.; DALMOLIN, R. S.; KNICKER, H.; KLAMT, E.; KÖGEL-KNABNER, I.; SIMÕES, M. L.; MARTIN-NETO, L. Characteristics of soil organic matter of different Brazilian Ferralsols under native vegetation as a function of soil depth. **Geoderma**, v. 124, n. 3-4, p. 319-333, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.05.008>.

DIGNAC, M. F.; DERRIEN, D.; BAROT, S.; CÉCILLON, L.; CHENU, C.; CHEVALLIER, T.; FRESCHET, G. T.; GARNIER, P.; GUENET, B.; HEDDE, M.; KLUMPP, K.; LASHERMES, G.; MARON, P.; NUNA, N.; ROUMET, C.; BASILE-DOELSCH, I. Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review. **Agronomy for sustainable development**, v. 37, p. 1-27, 2017. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0421-2>.

DOVE, N. C.; BARNES, M. E.; MORELAND, K.; GRAHAM, R. C.; BERHE, A. A.; HART, S. C. Depth dependence of climatic controls on soil microbial community activity and composition. **ISME communications**, v. 1, n. 1, p. 78, 2021. <https://doi.org/10.1038/s43705-021-00081-5>.

FABBRI, D.; HELLEUR, B. Characterization of the tetramethylammonium hydroxide thermochemolysis products of carbohydrates. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 49, n. 1-2, p. 277-293, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(98\)00085-0](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(98)00085-0)

FANG, Z.; YU, H.; LI, C.; WANG, B.; HUANG, J. Soil microbial biomass C: N: P stoichiometry is driven more by climate, soil properties and plant traits than by N

enrichment in a desert steppe. **Catena**, v. 216, p. 106402, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106402>.

FERRAREZI, R.S.; LIN, X.; NEIRA, A. C. G.; ZAMBON, F. T.; HU, H.; WANG, X.; HUANG, J-H.; FAN, G. Substrate pH Influences the Nutrient Absorption and Rhizosphere Microbiome of Huanglongbing-Affected Grapefruit Plants. **Front. Plant Sci.**, v. 13, 856937, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.856937>.

FILGUEIRAS, T. S.; NOGUEIRA, P. E.; BROCHADO, A. L.; GUALA, G. F. Caminhamento: um método expedito para levantamentos florísticos qualitativos. **Cadernos de geociências**, v. 12, n. 1, p. 39-43, 1994.

Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>. Acessado em: 20 set. 2024.

GAO, D.; BAI, E.; WANG, S.; ZONG, S.; LIU, Z.; FAN, X.; ZHAO, C.; HAGEDORN, F. Three-dimensional mapping of carbon, nitrogen, and phosphorus in soil microbial biomass and their stoichiometry at the global scale. **Global Change Biology**, v. 28, n. 22, p. 6728-6740, 2022. <https://doi.org/10.1111/gcb.16374>.

GLASER, B.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W.; RUIVO, M. D. L. Soil organic matter stability in Amazonian Dark Earths. **Amazonian Dark Earths: Origin Properties Management**, p. 141-158, 2003. https://doi.org/10.1007/1-4020-2597-1_8.

HAMER, U.; RUMPEL, C.; DIGNAC, M. F. Cutin and suberin biomarkers as tracers for the turnover of shoot and root derived organic matter along a chronosequence of Ecuadorian pasture soils. **European Journal of Soil Science**, v. 63, n. 6, p. 808-819, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01476.x>.

HANKE, D.; DICK, D. P. Estoque de carbono e mecanismos de estabilização da matéria orgânica do solo: uma revisão. **Revista Científica Agropampa**, v. 2, n. 2, p. 171-190, 2019. Disponível em: <https://periodicos.unipampa.edu.br/index.php/Agropampa/article/view/9681>. Acesso em: 3 abr. 2025.

HATTEN, J.; LILES, G. A 'healthy' balance—The role of physical and chemical properties in maintaining forest soil function in a changing world. In: *Developments in soil science*. **Elsevier**, 2019. p. 373-396. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63998-1.00015-X>.

HECKMAN, K.; THROCKMORTON, H.; HORWATH, W. R.; SWANSTON, C. W.; RASMUSSEN, C. Variation in the molecular structure and radiocarbon abundance of mineral-associated organic matter across a lithosequence of forest soils. **Soil Systems**, v. 2, n. 2, p. 36, 2018. <https://doi.org/10.3390/soilsystems2020036>.

HENDRICKSON, O. Q. Variation in the C:N ratio of substrate mineralized during forest humus decomposition. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 17, issue 4, p. 435-440, 1985. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90005-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90005-7).

HINTON, P. R. **Statistics Explained**. Routledge, 2014. <https://doi.org/10.4324/9781315797564>.

HOLANDA, A. C.; FELICIANO, A. L. P.; FREIRE, F. J.; SOUSA, F. Q.; FREIRE, S. R. O.; ALVES, A. R. Aporte de serapilheira e nutrientes em uma área de caatinga. **Ciência Florestal**, v. 27, p. 621-633, 2017. <https://doi.org/10.5902/1980509827747>.

HOULTON, B. Z.; WANG, Y. P.; VITOUSEK, P. M.; FIELD, C. B. A unifying framework for dinitrogen fixation in the terrestrial biosphere. **Nature**, v. 454, n. 7202, p. 327-330, 2008. <https://doi.org/10.1038/nature07028>.

HUSSAIN, M. B.; AL-HADIDI, S. H.; ERFANIAN, M. B.; YAHIA, M. N. D.; MULLUNGAL, M. N.; ALSAFRAN, M.; BAI, Y.; ALATALO, J. M. Photodegradation and its effect on plant litter decomposition in terrestrial ecosystems: a systematic review. **Soil Systems**, v. 7, n. 1, p. 6, 2023. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010006>

IPCC. Carbon and other biogeochemical cycles. In T. F. Stocker et al. (Eds.), Climate change 2013: **The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, p. 465-570, 2013. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.015>.

IUSS Working Group WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. **International Union of Soil Sciences (IUSS)**, Vienna, Austria, 2022.

JIA, J.; CAO, Z.; LIU, C.; ZHANG, Z.; LIN, L.; WANG, Y.; HAGHIPOUR, N.; WACKER, L.; BAO, H.; DITTMAR, T.; SIMPSON, M. J.; YANG, H.; CROWTHER, T. W.; EGLINTON, T. I.; HE, J.; FENG, X. Climate warming alters subsoil but not topsoil carbon dynamics in alpine grassland. **Global Change Biology**, v. 25, n. 12, p. 4383-4393, 2019. <https://doi.org/10.1111/gcb.14823>.

JONES, A. R.; DALAL, R. C.; GUPTA, V. V.; SCHMIDT, S.; ALLEN, D. E.; JACOBSEN, G. E.; BIRD, M.; GRANDY, A. S.; SANDERMAN, J. Molecular complexity and diversity of persistent soil organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 184, p. 109061, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109061>.

KEPPEL, G.; VAN NIEL, K. P.; WARDELL-JOHNSON, G. W.; YATES, C. J.; BYRNE, M.; MUCINA, L.; SCHUT, A. G. T.; HOPPER, S. D.; FRANKLIN, S. E. Refugia: identifying and understanding safe havens for biodiversity under climate change. **Global ecology and biogeography**, v. 21, n. 4, p. 393-404, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00686.x>.

KLEBER, M.; EUSTERHUES, K.; KEILUWEIT, M.; MIKUTTA, C.; MIKUTTA, R.; NICO, P. S. Mineral-organic associations: formation, properties, and relevance in soil

environments. **Advances in agronomy**, v. 130, p. 1-140, 2015. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.10.005>.

KÖCHY, M.; DON, A.; VAN DER MOLEN, M. K.; FREIBAUER, A. Mineral–organic associations: formation, properties, and relevance in soil environments. **Advances in agronomy**, v. 130, p. 1-140, 2015. <https://doi.org/10.5194/soil-1-367-2015>.

KÖGEL-KNABNER, I. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. **Soil biology and biochemistry**, v. 34, n. 2, p. 139-162, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00158-4](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00158-4).

KÖGEL-KNABNER, I.; GUGGENBERGER, G.; KLEBER, M.; KANDELER, E.; KALBITZ, K.; SCHEU, S.; EUSTERHUES, K.; LEINWEBER, P. Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 171, n. 1, p. 61-82, 2008. <https://doi.org/10.1002/jpln.200700048>.

KOLATTUKUDY, P. E. Structure, Biosynthesis, and Biodegradation of Cutin and Suberin. **Annual Review of Plant Biology**, v. 32, p. 539-567, 1981. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.32.060181.002543>.

LAGES, G. A.; MARINHO, M. S.; NASCIMENTO, M. A. L.; MEDEIROS, V. C.; DANTAS, E. L. Geochronology and structural and petrological features of the Bravo Pluton, Central Domain of the Borborema Province, Northeast Brazil: an early trans-alkaline granite in the post-collisional stage of the Brasiliano Orogeny. **Brazilian Journal of Geology**, v. 46, p. 41-61, 2016. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620150033>

LAGES, G. A.; MARINHO, M. S.; NASCIMENTO, M. A. L.; MEDEIROS, V. C.; DANTAS, E. L.; FIALHO, D. Mar de Bolas do Lajedo do Pai Mateus, Cabaceiras, PB - Campo de matações graníticas gigantes e registros rupestres de civilização pré-colombiana. In: WINGE, M.; SCHOBENHAUS, C.; SOUZA, C. R. G.; FERNANDES, A. C. S.; BERBERT-BORN, M.; SALLUN FILHO, W.; QUEIROZ, E. T.; (Edit.) **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. 2013.

LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global change biology**, v. 26, n. 1, p. 261-273, 2020. <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>.

LEHMANN, J.; KLEBER, M. A natureza controversa da matéria orgânica do solo. **Natureza**, v. 528, n. 7580, pág. 60-68, 2015. <https://doi.org/10.1038/nature16069>.

LEUTHOLD, S.; LAVALLEE, J. M.; HADDIX, M. L.; COTRUFO, M. F. Contrasting properties of soil organic matter fractions isolated by different physical separation methodologies. **Geoderma**, v. 445, p. 116870, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116870>.

LIANG, C.; AMELUNG, W.; LEHMANN, J.; KÄSTNER, M. Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter. **Global change biology**, v. 25, n. 11, p. 3578-3590, 2019. <https://doi.org/10.1111/gcb.14781>.

LIANG, C.; SCHIMEL, J. P.; JASTROW, J. D. A importância do anabolismo no controle microbiano sobre o armazenamento de carbono no solo. **Nature microbiology**, v. 2, n. 8, p. 1-6, 2017. <https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2017.105>.

LIANG, Y.; RILLIG, M. C.; CHEN, H. Y.; SHAN, R.; MA, Z. Soil pH drives the relationship between the vertical distribution of soil microbial biomass and soil organic carbon across terrestrial ecosystems: A global synthesis. **Catena**, v. 238, p. 107873, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107873>.

LOCATELLI, J. L.; SANTOS, R. S.; TENELLI, S.; SOARES, M. B.; DEL GROSSO, S.; STEWART, C. E.; POPIN, G. V.; BERTOL, F. D. zen; CARVALHO, J. L. N.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P. Soil carbon allocation, composition, and sequestration changes induced by cropping diversification in tropical systems. **Soil and Tillage Research**, v. 248, p. 106464, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106464>.

LUGATO, E.; LAVALLEE, J. M.; HADDIX, M. L.; PANAGOS, P.; COTRUFO, M. F. Different climate sensitivity of particulate and mineral-associated soil organic matter. **Nature Geoscience**, v. 14, n. 5, p. 295-300, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00744-x>.

LYU, M.; HOMYAK, P. M.; XIE, J.; PEÑUELAS, J.; RYAN, M. G.; XIONG, X.; SARDANS, J.; LIN, W.; WANG, M.; CHEN, G.; YANG, Y. Litter quality controls tradeoffs in soil carbon decomposition and replenishment in a subtropical forest. **Journal of Ecology**, v. 111, p. 2181-2193, 2023. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14167>.

MACEDO, R. S.; MORO, L.; LAMBAIS, É. O.; LAMBAIS, G. R.; BAKKER, A. P. D. Effects of degradation on soil attributes under Caatinga in the Brazilian semi-arid. **Revista Árvore**, v. 47, p. e4702, 2023. <https://doi.org/10.1590/1806-908820230000002>.

MAIA, R. P.; NASCIMENTO, M. A. L. Relevos graníticos do Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 2, 2018. <https://doi.org/10.20502/rbg.v19i2.1295>.

MANZONI, S.; COTRUFO, M. F. Mechanisms of soil organic carbon and nitrogen stabilization in mineral-associated organic matter—insights from modeling in phase space. **Biogeosciences**, v. 21, n. 18, p. 4077-4098, 2024. <https://doi.org/10.5194/bg-21-4077-2024>.

MARSCHNER, P. Processes in submerged soils—linking redox potential, soil organic matter turnover and plants to nutrient cycling. **Plant and Soil**, v. 464, n. 1, p. 1-12, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05040-6>.

MELO, A. F. D.; SOUZA, C. M. M.; REGO, L. G. S.; LIMA, R. N. S.; MOURA, I. N. B. M. Pedogênese de chernossolos derivados de diferentes materiais de origem no oeste

potiguar. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 13, n. 3, p. 229-235, 2017. <https://doi.org/10.30969/acsa.v13i3.890>.

MENEZES, R.; SAMPAIO, E.; GIONGO, V.; PÉREZ-MARIN, A. Ciclagem biogeoquímica em ecossistemas terrestres do Bioma Caatinga. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, p. 643-653, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000400004>.

MEYER, N.; KUHWALD, M.; PETERSEN, J. F.; DUTTMANN, R. Soil development in weathering pits of a granitic dome (Enchanted Rock) in central Texas. **Catena**, v. 199, p. 105084, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105084>.

MORO, M. F.; AMORIM, V. O.; QUEIROZ, L. P.; COSTA, L. R. F.; MAIA, R. P.; TAYLOR, N. P.; ZAPPI, D. C. Biogeographical districts of the Caatinga dominion: a proposal based on geomorphology and endemism. **The Botanical Review**, v. 90, n. 4, p. 376-429, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12229-024-09304-5>.

NASCIMENTO, S. S.; LIMA, E. R. V.; LIMA, P. P. S. Análise temporal da degradação da Caatinga na sub-bacia do Alto Paraíba. **Revista OKARA**, v.8, n.1, 2014.

NEAL, J.; HAWKER, L. **FABDEM V1-2**. 2023. <https://doi.org/10.5523/bris.s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn>.

OLIVEIRA FILHO, J. S.; DINIZ, R. S. N.; SILVA, R. C.; MOREIRA, V. O. G.; VIEIRA, J. M.; BARRETO, M. M. S.; CARVALHO, M. S. B. S.; TRITSCH, I.; SCOPEL, E. Carbon and nitrogen stocks in Lithic soils: Environmental drivers and land-use implication in Brazilian dry ecosystems. **Journal of Soils and Sediments**, p. 1476-1488, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11368-024-03732-x>.

OLIVEIRA FILHO, J. S.; LOPES R. O.; ARAÚJO, M. O.; MAGALHÃES, M. S.; VASCONCELOS, M. D. S.; LIMA, A. R. L.; ... & PEREIRA, M. G. How does increasing humidity in the environment affect soil carbon and nitrogen stocks and the C/N ratio in tropical drylands? Evidence from northeastern Brazil. **Catena**, v. 213, p. 106208, 2022b. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106208>.

OLIVEIRA, A. N.; OLIVEIRA, L. A.; ANDRADE, J. S.; CHAGAS JUNIOR, A. F. Enzimas hidrolíticas extracelulares de isolados de rizóbia nativos da Amazônia Central, Amazonas, Brasil. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612006000400022>.

OTTAVIANI, G.; MARCANTONIO, M.; MUCINA, L. Soil depth shapes plant functional diversity in granite outcrops vegetation of Southwestern Australia. **Plant Ecology & Diversity**, v. 9, n. 3, p. 263-276, 2016. <https://doi.org/10.1080/17550874.2016.1211192>.

PEBERDY, J. F. Fungal Cell Walls - A Review. In: Kuhn, P.J., Trinci, A.P.J., Jung, M.J., GOOSEY, M. W.; COPPING, L. G. (eds). **Biochemistry of Cell Walls and Membranes in Fungi**. Springer, Berlin, Heidelberg. 1990. https://doi.org/10.1007/978-3-642-74215-6_2.

PICCOLO, A.; DROSOS, M. Chapter Seven - The supramolecular structure of the soil humeome and significance of humification. **Advances in Agronomy**, v. 188, p. 405, 2024. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2024.06.006>.

PLAZA, C.; ZACCONE, C.; SAWICKA, K.; MÉNDEZ, A. M.; TARQUIS, A.; GASCÓ, G.; HEUVELINK, G. B. M.; SCHUUR, E. A. G.; MAESTRE, F. T. Soil resources and element stocks in drylands to face global issues. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 13788, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32229-0>.

PRADO, D. E. Florestas sazonalmente secas da América do Sul tropical: de ecossistemas esquecidos a uma nova unidade fitogeográfica. **Edinburgh Journal of botany**, v. 57, n. 3, p. 437-461, 2000. <https://doi.org/10.1017/S096042860000041X>.

PRIMO, A. A.; LUSTOSA FILHO, J. F.; MAROTA, H. B.; TONUCCI, R. G.; SILVA, I. R.; OLIVEIRA, T. S. Different composition of plant residues as a driver of microbial community structure and soil organic matter composition: A microcosm study. **Pedobiologia**, v. 106, p. 150985, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2024.150985>.

QIU, Y.; ZHANG, K.; ZHAO, Y.; ZHAO, Y.; WANG, B.; WANG, Y.; HE, T.; XU, X.; BAI, T.; ZHANG, Y.; HU, S. Climate warming suppresses soil abundant fungal taxa and reduces soil carbon efflux in a semi-arid grassland. **bioRxiv**, p. 2023.10. 08.561373, 2023. <https://doi.org/10.1101/2023.10.08.561373>.

QUEIROZ, L. P.; CARDOSO, D.; FERNANDES, M. F.; MORO, M. F. Diversity and evolution of flowering plants of the Caatinga domain. **Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America**, p. 23-63, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68339-3_2.

REMPFERT, K. R.; BELL, S. L.; KASANKE, C. P.; ZHAO, Q.; ZHAO, X.; LIPTON, A. S.; HOFMOCKEL, K. S. Biomolecular budget of persistent, microbial-derived soil organic carbon: The importance of underexplored pools. **Science of the Total Environment**, v. 932, p. 172916, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172916>.

ROWLEY, M. C.; VERRECCHIA, É. P. Estabilização mediada por cálcio do carbono orgânico do solo. **Biogeochemistry**, v. 137, n. 1, p. 27-49, 2018. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(03\)81004-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(03)81004-0).

SALVADOR, M. S. S.; BERNADO, I. E. S.; LIMA, V. R. P.; BORGES NETO, I. O. Floristic diversity in Lajedo do Bravo, Cariri paraibano. **Revista Geotemas**, v. 13, p. e02328-e02328, 2023. <https://doi.org/10.33237/2236-255X.2023.5137>.

SANTOS, H. G.; CARVALHO JUNIOR, W.; DART, R. O.; AGLIO, M. L. D.; SOUZA, J. S.; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTINS, A. L. S.; OLIVEIRA, A. P. O Novo Mapa de Solos do Brasil Legenda Atualizada escala 1:5.000.000. **Embrapa Solos**, Rio de Janeiro. 2011.

SARKAR, B.; SINGH, M.; MANDAL, S.; CHURCHMAN, G. J.; BOLAN, N. N. Clay minerals - Organic matter interactions in relation to carbon stabilization in soils. In: The future of soil carbon. **Academic Press**, 2018. p. 71-86. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811687-6.00003-1>.

SCHUT, A. G. T.; WARDELL-JOHNSON, G. W.; YATES, C. J.; KEPPEL, G.; BARAN, I.; FRANKLIN, S. E.; HOPPER, S. D.; VAN NIEL, K. P.; MUCINA, L.; BYRNE, M. Rapid characterisation of vegetation structure to predict refugia and climate change impacts across a global biodiversity hotspot. **PLoS One**, v. 9, n. 1, p. e82778, 2014. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082778>.

SILVA NETO, E. C.; COELHO-JUNIOR, M. G.; HORÁK-TERRA, I.; GONÇALVES, T. S.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G. Organic soils: formation, classification and environmental changes records in the highlands of southeastern Brazil. **Sustainability**, v. 15, n. 4, p. 3416, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15043416>.

SILVA, D. F.; ARAUJO, A. S.; LIMA, A. Y.; MOTA, J. C.; NASCIMENTO, Í. V.; QUEIROZ, A. S.; MEDEIROS, E. V.; COSTA, D. P.; MELO, V. M. M.; CARDOSO, E. J. B. N.; VERMA, J. P.; SMITH, G. R.; MENDES, L. W.; PEREIRA, A. P. Enzymatic stoichiometry in degraded soils after two decades of restoration in a Brazilian semiarid region. **Catena**, v. 236, p. 107768, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107768>.

SILVA, H. F.; SOUSA, P. V. F.; ESCOBAR, M. E. O.; OLIVEIRA, T. S. Changes in the composition of soil organic matter caused by organic and conventional management in the long term. **Journal of Environmental Management**, v. 374, p. 124018, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.124018>.

SILVA, J. M. C. D.; BARBOSA, L. C. F.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. The Caatinga: understanding the challenges. **Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America**, p. 3-19, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68339-3_1.

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. **Plant and soil**, v. 241, p. 155-176, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>.

SOKOL, N. W.; WHALEN, E. D.; JILLING, A.; KALLENBACH, C.; PETT-RIDGE, J.; GEORGIOU, K. Global distribution, formation and fate of mineral-associated soil organic matter under a changing climate: A trait-based perspective. **Functional Ecology**, v. 36, n. 6, p. 1411-1429, 2022. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.14040>.

SOLLINS, P.; CALDWELL, B. A. Estabilização e desestabilização da matéria orgânica do solo: mecanismos e controles. **Geoderma**, v. 74, n. 1-2, p. 65-105, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(96\)00036-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(96)00036-5).

SOUZA, B. I.; MENEZES, R.; CÁMARA A. R. Desertification effects on the species composition of the Caatinga biome, Paraíba/Brazil. **Investigaciones geográficas**, n. 88, p. 45-59, 2015. <https://doi.org/10.14350/rig.44092>.

SOUZA, B. I.; SOUZA, R. S. Processo de ocupação dos Cariris Velhos–PB e efeitos na cobertura vegetal: contribuição à Biogeografia Cultural do semiárido. **Caderno de Geografia**, v. 26, n. 2, p. 229-258, 2016. <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2016v26nesp2p229>.

SOUZA, J. J. L. L.; MEDEIROS, V. B.; OLIVEIRA, P. E.; SOUZA, B. I.; BARRETO, A. M. F.; OLIVEIRA, É. V.; PESSEDA, L. C. R. Vegetable coverage, anthropogenic action, and paleoclimates in the Caatinga. **Mercator (Fortaleza)**, v. 22, p. e22011, 2023. <https://doi.org/10.4215/rm2023.e22011>.

SOUZA, J. J. L. L.; SOUZA, B. I.; XAVIER, R. A.; PACHECO, A. A.; PESSEDA, L. C. R.; BRITO, E. S. Archaeoanthrosol formation in the Brazilian semiarid. **Catena**, v. 193, p. 104603, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104603>.

SOUZA, N. R. L.; XAVIER, R. A.; BORGES NETO, I. O. Geodiversidade e Patrimônio Geomorfológico do Plúton Bravo no semiárido paraibano. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 25, n. 1, 2024. <https://doi.org/10.20502/rbgeomorfologia.v25i1.2460>.

TADINI, A. M.; GORANOV, A. I.; MARTIN-NETO, L.; BERNARDI, A. C.; OLIVEIRA, P. P.; PEZZOPANE, J. R.; HATCHER, P. G. Structural characterization using 2D NMR spectroscopy and TMAH-GC × GC-MS: Application to humic acids from soils of an integrated agricultural system and an Atlantic native forest. **Science of the total environment**, v. 815, p. 152605, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152605>.

TANAKA, R. T.; WEBER, O. L. D. S.; TORRES, G. N.; MIRANDA, J. G. D.; COUTO, E. G. Soil aggregation and organic carbon under different management systems in the cerrado of Mato Grosso. **Revista Caatinga**, v. 38, p. e12508, 2024. <https://doi.org/10.1590/1983-21252025v38i2508rc>.

TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M. S. P.; BARBOSA, A. A.; RODRIGUEZ, D. A.; OLIVEIRA SANTANA, M.; SESTINI, M. F. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000–2016. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 73, p. 197-206, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.012>.

TWIDALE, C. R.; ROMANÍ, J. R. V. Landforms and geology of granite terrains. **CRC Press**, 2005. <https://doi.org/10.1201/9780367803407>.

USSIRI, D. A.; LAL, R.; USSIRI, D. A.; LAL, R. The Global Carbon Inventory. In: **Carbon Sequestration for Climate Change Mitigation and Adaptation**. Springer, p. 77-102, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53845-7_4.

VANSCHOENWINKEL, B.; PAULA, L. F. A.; SNOEKS, J. M.; VAN DER STOCKEN, T.; BUSCHKE, F. T.; POREMBSKI, S.; SILVEIRA, F. A. O. The ecological and evolutionary dynamics of inselbergs. **Biological Reviews**, v. 100, n. 2, p. 481-507, 2025. <https://doi.org/10.1111/brv.13150>.

WANG, X.; WANG, C.; FAN, X.; SUN, L.; SANG, C.; WANG, X.; ... & BAI, E. Mineral composition controls the stabilization of microbially derived carbon and nitrogen in soils: Insights from an isotope tracing model. **Global Change Biology**, v. 30, n. 1, p. e17156, 2024. <https://doi.org/10.1111/gcb.17156>.

WILLARD, S. J.; LIANG, G.; ADKINS, S.; FOLEY, K.; MURRAY, J.; WARING, B. Land use drives the distribution of free, physically protected, and chemically protected soil organic carbon storage at a global scale. **Global Change Biology**, v. 30, n. 9, p. e17507, 2024. <https://doi.org/10.1111/gcb.17507>.

WITZGALL, K.; VIDAL, A.; SCHUBERT, D. I.; HÖSCHEN, C.; SCHWEIZER, S. A.; BUEGGER, F.; POUTEAU, V.; CHENU, C.; MUELLER, C. W. Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon. **Nature communications**, v. 12, n. 1, p. 4115, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24192-8>.

XAVIER, R. A. Processos geomorfológicos e evolução da paisagem no semiárido brasileiro. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 7, n. 1, p. 59-69, 2021. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n1ID20692>.

XIA, Q.; RUFTY, T.; SHI, W. Soil microbial diversity and composition: Links to soil texture and associated properties. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 149, 107953, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107953>.

YANG, Y.; GUNINA, A.; CHENG, H.; LIU, L.; WANG, B.; DOU, Y.; WANG, Y.; LIANG, C.; AN, S.; CHANG, S. X. Unlocking Mechanisms for Soil Organic Matter Accumulation: Carbon Use Efficiency and Microbial Necromass as the Keys. **Global Change Biology**, v. 31, n. 1, p. e70033, 2025. <https://doi.org/10.1111/gcb.70033>.

YATES, C. J.; ROBINSON, T.; WARDELL-JOHNSON, G. W.; KEPPEL, G.; HOPPER, S. D.; SCHUT, A. G. T.; BYRNE, M. High species diversity and turnover in granite inselberg floras highlight the need for a conservation strategy protecting many outcrops. **Ecology and Evolution**, v. 9, n. 13, p. 7660-7675, 2019. <https://doi.org/10.1002/ece3.5318>.

YU, W.; HUANG, W.; WEINTRAUB-LEFF, S. R.; HALL, S. J. Where and why do particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM) differ among diverse soils?. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 172, p. 108756, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108756>.

7. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A presente tese demonstrou a relevância dos inselbergs na compreensão dos processos pedogenéticos responsáveis pela formação de solos atípicos na Caatinga, validando a hipótese inicialmente proposta.

A revisão da literatura indicou que os inselbergs constituem o tipo de afloramento rochoso mais recorrente nos estudos analisados, sendo frequentemente descritos como refúgios ecológicos por abrigarem bolsões de solo capazes de sustentar biodiversidade especializada em ambientes de clima quente e seco, apesar da escassez de investigações voltadas à pedogênese nesses contextos.

O arranjo topográfico complexo dos inselbergs favorece a constituição e manutenção de bolsões de solo, onde a retenção de umidade, o acúmulo de sedimentos e resíduos orgânicos e a proteção contra os processos erosivos favorecem a formação de solos, com processos pedogenéticos característicos de ambientes mais úmidos, como a melanização, gleização e ocorrência de feições redoximórficas. Além disso, são distróficos, ácidos e ricos em CO, contrastando com os solos rasos, eutróficos, mais incipientes e com baixos teores de CO da Caatinga típica. A vegetação nativa, adaptada a nichos de maior umidade, contribui à ciclagem de nutrientes e na persistência da MOS, reforçando a importância da preservação desses ecossistemas.

Os mecanismos de persistência da MOS divergiram entre o Campo de Inselbergs Graníticos (CIG) e a Caatinga típica. No CIG, a estabilização ocorreu por associações organo-minerais e eficiência microbiana na conversão de frações lábeis (POM) em formas mais estáveis (MAOM). Na Caatinga, a aridez acelera a oxidação, resultando em MOS aromaticamente estruturada, porém vulnerável à degradação física e química. Tais evidências sugerem que a perda da cobertura vegetal nativa no CIG ameaçaria seu papel como reservatório de C, enquanto no contexto da Caatinga típica, práticas agrícolas inadequadas tendem a intensificar a desertificação, reforçando a necessidade de estratégias de manejo adaptadas às dinâmicas locais.

Em relação a conservação, recomenda-se priorizar a proteção dos inselbergs como *hotspots* de biodiversidade e estoques de C resilientes, além de integrar seu estudo a políticas de mitigação das mudanças climáticas. Futuras pesquisas devem explorar a

heterogeneidade topográfica na regulação hídrica, a atividade enzimática microbiana e a mineralogia dos solos, reduzindo lacunas sobre o papel da Caatinga no ciclo global de C.

Esta tese reforça a ideia de que os inselbergs podem servir como laboratórios naturais para compreender a resiliência de ecossistemas em ambientes secos, demandando abordagens interdisciplinares que integrem conhecimentos da climatologia, ecologia, geomorfologia e pedologia, em prol da sustentabilidade do semiárido.

REFERÊNCIAS GERAIS

- AB'SÁBER, A. N. A teoria dos refúgios: origem e significado. **Revista do Instituto florestal**, v. 4, n. 1, p. 29-34, 1992.
- ADHIKARI, K.; HARTEMINK, A. E. Linking soils to ecosystem services - A global review. **Geoderma**, v. 262, p. 101-111, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>.
- ADINGO, S.; YU, J.; XUELU, L.; LI, X.; JING, S.; XIAONG, Z. Variation of soil microbial carbon use efficiency (CUE) and its Influence mechanism in the context of global environmental change: a review. **PeerJ**, v. 9, e12131, 2021. <http://doi.org/10.7717/peerj.12131>.
- ALBUQUERQUE, A. S.; FREIRE, F. J.; LEITE, M. J. H.; MELO, F. F.; FREIRE, C. S.; MARQUES, P. R. D.; PINTO, A. V. F.; MORAIS, Y. Y. G. A. Carbono e nitrogênio do solo em área de Floresta Tropical Seca no Nordeste Brasileiro. **Caderno Pedagógico**, v. 22, n. 1, p. e13389-e13389, 2025. <https://doi.org/10.54033/cadpedv22n1-158>.
- ALBUQUERQUE, A. W.; LOMBARDI NETO, F.; SRINIVASAN, V. S. Effects of native semiarid vegetation deforestation on soil and water losses of a haplargids in Sumé, Paraíba, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 121-128, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000100013>.
- ALMAGRO, M.; MARTÍNEZ-LÓPEZ, J.; MAESTRE, F. T.; REY, A. The contribution of photodegradation to litter decomposition in semiarid Mediterranean grasslands depends on its interaction with local humidity conditions, litter quality and position. **Ecosystems**, v. 20, p. 527-542, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-0036-5>.
- ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 27-32, 2000.
- ALVES, G. B.; OLIVEIRA, F. S.; SILVA, A. H. N.; SOUZA JUNIOR, V. S. Toposequence: What are we talking about?. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 48, e0230137, 2024. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20230137>.
- ANDREETTA, A.; DIGNAC, M. F.; CARNICELLI, S. Biological and physico-chemical processes influence cutin and suberin biomarker distribution in two Mediterranean forest soil profiles. **Biogeochemistry**, v. 112, n. 1, p. 41-58, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9693-9>.
- ANGST, G.; MUELLER, K. E.; NIEROP, K. G.; SIMPSON, M. J. Plant-or microbial-derived? A review on the molecular composition of stabilized soil organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 156, p. 108189, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108189>.

ANTHELME, F.; MATO, M. W.; MALEY, J. Elevation and local refuges ensure persistence of mountain specific vegetation in the Nigerien Sahara. **Journal of Arid Environments**, v. 72, n. 12, p. 2232-2242, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.07.003>.

ARAÚJO FILHO, J. C.; CORREA, M. M.; PAIVA, A. Q.; COSTA, O. V.; VALLADARES, G. S.; RIBEIRO, M. R.; SCHAEFER, C. E. G. R. Semi-arid Soils of the Caatinga Biome of Northeastern Brazil. In: **The Soils of Brazil**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 175-193. https://doi.org/10.1007/978-3-031-19949-3_6.

ARAÚJO FILHO, J. C.; RIBEIRO, M. R.; BURGOS, N.; MARQUES, F. A. V. Solos da Caatinga. In: **Pedologia - Solos dos biomas brasileiros**. (Orgs.). CURI, N.; KER, J. C.; NOVAIS, R. F.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C. E. G. R. S. 1ª Ed. Viçosa – MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2017, p. 227-260.

ARCA, V.; POWER, S. A.; DELGADO-BAQUERIZO, M.; PENDALL, E.; OCHOA-HUESO, R. Seasonal effects of altered precipitation regimes on ecosystem-level CO₂ fluxes and their drivers in a grassland from Eastern Australia. **Plant and Soil**, v. 460, p. 435-451, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04811-x>.

ARRUDA, D. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; CORRÊA, G. R.; RODRIGUES, P. M. S.; DUQUE-BRASIL, R.; FERREIRA-JR, W. G.; OLIVEIRA-FILHO, A.T. Landforms and soil attributes determine the vegetation structure in the Brazilian semiarid. **Folia Geobot**, v. 50, p. 175-184, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12224-015-9221-0>.

AUSTIN, A. T. Has water limited our imagination for aridland biogeochemistry?. **Trends in ecology & evolution**, v. 26, n. 5, p. 229-235, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.02.003>.

AUSTIN, A. T.; VIVANCO, L. Decomposição de serapilheira vegetal em um ecossistema semiárido controlado por fotodegradação. **Nature**, v. 442, n. 7102, p. 555-558, 2006. <https://doi.org/10.1038/nature05038>.

BALLÉN, L. A. C.; SOUZA, B. I.; LIMA, E. R. V. Analysis of the spatial and temporal variations of vegetation cover in the environmental protection area of Cariri, Paraíba, Brazil. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 36, n. 3, p. 555-571, 2016. <https://doi.org/10.5216/bgg.v36i3.44558>.

BARBOSA, W. R.; ROMERO, R. E.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; COOPER, M.; SARTOR, L. R.; MOYA PARTITI, C. S.; JORGE, F. O.; COHEN, R.; DE JESUS, S. L.; FERREIRA, T. O. Effects of slope orientation on pedogenesis of altimontane soils from the Brazilian semi-arid region (Baturité massif, Ceará). **Environmental earth sciences**, v. 73, p. 3731-3743, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3660-4>.

BÁRCENAS-ARGUELLO, M. L.; GUTIERREZ-CASTORENA, M. C.; TERRACE, T.; LOPEZ-MATA, L. Rock-Soil Preferences of Three *Cephalocereus* (Cactaceae) Species of Tropical Dry Forests. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n. 4, p. 1374-1382, 2010. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0310>.

BARTKOWSKI, B.; BARTKE, S.; HELMING, K.; PAUL, C.; TECHEN, A.; HANSJÜRGENS, B. Potential of the economic valuation of soil-based ecosystem services to inform sustainable soil management and policy. **PeerJ**, v. 8, e8749, p. 1-31, 2020. <https://doi.org/10.7717/peerj.8749>.

BASTOS, F. H.; LIMA, D. L. S.; CORDEIRO, A. M. N.; MAIA, R. P. Relevos graníticos do nordeste brasileiro: uma proposta taxonômica. In: JUNIOR, O. A. C.; GOMES, M. C. V.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T. (Ed.). **Revisões de literatura da Geomorfologia brasileira**. São Paulo: União da geomorfologia brasileira, 2021, p. 737- 762.

BENSLAMA, A.; LUCAS, I. G.; JORDAN VIDAL, M. M.; ALMENDRO-CANDEL, M. B.; NAVARRO-PEDREÑO, J. Carbon and Nitrogen Stocks in Topsoil under Different Land Use/Land Cover Types in the Southeast of Spain. **AgriEngineering**, v. 6, n. 1, p. 396-408, 2024. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6010024>.

BERNARDI, A. C. C.; TADINI, A. M.; BIELUCZYK, W.; PEZZOPANE, J. R. M.; MACHADO, P. L. O. A.; MADARI, B. E.; MARTIN NETO, L. Manejo conservacionista da matéria orgânica do solo: sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. In: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN NETO, L.; ANDRADE, C. A. (Eds.). **Entendendo a Matéria Orgânica Do Solo Em Ambientes Tropical e Subtropical**. Embrapa, Brasília, 2023, p. 569.

BÉTARD, F. Spatial variations of soil weathering processes in a tropical mountain environment: The Baturité massif and its piedmont (Ceará, NE Brazil). **Catena**, v. 93, p. 18-28, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.01.013>.

BEUCHLE, R.; GRECCHI, R. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; SELIGER, R.; EVA, H. D.; SANO, E.; ACHARD, F. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. **Applied Geography**, v. 58, p. 116-127, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.01.017>.

BORAH, B.; PARMAR, P. Soil Organic Carbon Dynamics: Drivers of Climate Change-Induced Soil Organic Carbon Loss at Various Ecosystems. **International Journal of Environment and Climate Change**, v. 14, p. 153-174, 2024. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2024/v14i104477>.

BORGES NETO, I. O.; XAVIER, R. A.; SOUZA, B. I.; SANTOS, L. J. C.; SOARES, D. A.; SOUZA, J. J. L. L. Preliminary experimental data on surface runoff and soil loss in the Caatinga. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 48, n. 9, p. 1712-1723, 2023. <https://doi.org/10.1002/esp.5581>.

BOUMA, J.; BONFANTE, A.; BASILE, A.; VAN TOL, J.; BROEKE, M. J. D. H.; MULDER, M.; HEINEN, M.; ROSSITER, D. G.; POGGIO, L.; HIRMAS, D. R. How can pedology and soil classification contribute towards sustainable development as a data source and information carrier? **Geoderma**, v. 424, p. 1-11, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115988>.

BRAMER, I.; ANDERSON, B. J.; BENNIE, J.; BLADON, A. J.; DE FRENNE, P.; HEMMING, D.; HILL, R. A.; KEARNEY, M. R.; KÖRNER, C.; KORSTJENS, A. H.; LENOIR, J.; MACLEAN, I. M. D.; MARSH, C. D.; MORECROFT, M. D.; OHLEMÜLLER, R.; SLATER, H. D.; SUGGITT, A. J.; ZELLWEGER, F.; GILLINGHAM, P. K. Advances in monitoring and modelling climate at ecologically relevant scales. In: **Advances in ecological research**. Academic Press, 2018. p. 101-161. <https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2017.12.005>.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, n. 1-2, p. 3-22, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma>.

BUI, E. N.; HENDERSON, B. L. C:N:P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors. **Plant and Soil**, v. 373, p. 553-568, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1823-9>.

BURKE, A. Determinants of inselberg floras in arid Nama Karoo landscapes. **Journal of Biogeography**, v. 28, n. 10, p. 1211-1220, 2001. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2001.00623.x>.

BURKE, A. How special are Etendeka mesas? Flora and elevation gradients in an arid landscape in north-west Namibia. **Journal of Arid Environments**, v. 55, n. 4, p. 747-764, 2003a. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(02\)00293-8](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(02)00293-8).

BURKE, A. Inselbergs in a changing world - global trends. **Diversity and Distributions**, v. 9, n. 5, p. 375-383, 2003b. <https://doi.org/10.1046/j.1472-4642.2003.00035.x>.

BURKE, A. Properties of soil pockets on arid Nama Karoo inselbergs—the effect of geology and derived landforms. **Journal of Arid Environments**, v. 50, n. 2, p. 219-234, 2002. <https://doi.org/10.1006/jare.2001.0907>.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E.T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil science society of America journal**, v. 56, n. 3, p. 777-783, 1992. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>.

CAMPOS, D. V. B.; MACHADO, P. L. O. A. Physical fractionation of organic matter. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.). **Soil Analysis Methods Manual**. 3 Ed. revised and expanded edition, Brasília-DF: Embrapa, chap. 7, 2017, p. 415-425.

CARVALHO, M. L.; MACIEL, V. F.; BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L. N.; FERREIRA, T. O.; CERRI, C. E. P.; CHERUBIN, M. R. Stabilization of organic matter in soils: drivers, mechanisms, and analytical tools—a literature review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, p. e0230130, 2023. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220130>.

CELAYA-MICHEL, H.; CASTELLANOS-VILLEGAS, A. E. Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. **Terra Latinoamericana**, v. 29, n. 3, p. 343-356, 2011.

CERTINI, G.; CORTI, G.; UGOLINI, F. C.; DE SIENA, C. Rock weathering promoted by embryonic soils in surface cavities. **European Journal of Soil Science**, v. 53, n. 1, p. 139-146, 2002. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2002.00434.x>.

CHANG, Y.; SOKOL, N. W.; VAN GROENIGEN, K. J.; BRADFORD, M. A.; JI, D.; CROWTHER, T. W.; LIANG, C.; LUO, Y.; KUZYAKOV, Y.; WANG, J.; DING, F. A stoichiometric approach to estimate sources of mineral-associated soil organic matter. **Global Change Biology**, v. 30, n. 1, p. e17092, 2024. <https://doi.org/10.1111/gcb.17092>.

CHEFETZ, B.; CHEN, Y.; CLAPP, C. E.; HATCHER, P. G. Characterization of organic matter in soils by thermochemolysis using tetramethylammonium hydroxide (TMAH). **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 2, p. 583-589, 2000. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642583x>.

CHEN, D.; XING, W.; LAN, Z.; SALEEM, M.; WU, Y.; HU, S.; BAI, Y. Direct and indirect effects of nitrogen enrichment on soil organisms and carbon and nitrogen mineralization in a semi-arid grassland.. **Functional Ecology**, v. 33, n. 1, p. 175-187, 2019. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13226>.

CHEN, X.; NI, X.; ZHENG, G.; HU, M.; CHEN, H. Y. H. Changes in plant lignin components and microbial necromass matter with subtropical forest restoration. **Geoderma**, v. 445, 116875, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116875>.

CHENCHOUNI, H.; NEFFAR, S. Soil organic carbon stock in arid and semi-arid steppe rangelands of North Africa. **Catena**, v. 211, p. 106004, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.106004>.

CLARK-IOANNOU, S. M.; WARDELL-JOHNSON, G. W.; MILLETT, J. Multi-scale biogeographic controls over plant communities on granite outcrops in the Southwest Australian Floristic Region. **Austral Ecology**, v. 46, p. 627-639, 2021. <https://doi.org/10.1111/aec.13018>.

CONFORTI, M.; LONGOBUCCO, T.; SCARCIGLIA, F.; NICEFORO, G.; MATTEUCCI, G.; BUTTAFUOCO, G. Interplay between soil formation and geomorphic processes along a soil catena in a Mediterranean mountain landscape: an integrated pedological and geophysical approach. **Environmental Earth Sciences**, v. 79, n. 2, p. 59, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8802-2>.

CONFORTI, M.; LUCÀ, F.; SCARCIGLIA, F.; MATTEUCCI, G.; BUTTAFUOCO, G. Soil carbon stock in relation to soil properties and landscape position in a forest ecosystem of southern Italy (Calabria region). **Catena**, v. 144, p. 23-33, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.04.023>.

CORRÊA, A. C. B.; TAVARES, B. A. C.; MONTEIRO, K. A.; CAVALCANTI, L. C. S.; LIRA, D. R. Megamorfologia e morfoestrutura do Planalto de Borborema. **Revista do Instituto Geológico (Descontinuada)**, v. 31, n. 1-2, p. 35-52, 2010. <https://doi.org/10.5935/0100-929X.20100003>.

COSTA, H. L.; DINIZ, M. T. M.; XAVIER, R. A.; QUEIROZ, L. S.; MAIA, R. P. Quantitative assessment of the geomorphological heritage of the Pedra da Boca State Park's surroundings: Key geoheritage site in Northeast Brazil. **International Journal of Geoheritage and Parks**, v. 11, n. 3, p. 433-449, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijgeop.2023.07.001>.

COTRUFO, M. F.; RANALLI, M. G.; HADDIX, M. L.; SIX, J.; LUGATO, E. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. **Nature Geoscience**, v. 12, n. 12, p. 989-994, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6>.

CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Geologia e recursos minerais da folha Boqueirão SB.24-Z-D-III: estado da Paraíba**. LAGES, G. A. Relatório Técnico. 2017, p. 167. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/17654>. Acesso: 04 mar. 2025.

CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Mapa geológico da província Borborema: projeto geologia e potencial mineral da província Borborema, em escala de 1:1.000.000**. SANTOS, F. G.; PINÉO, T. R. G.; MEDEIROS, V. C.; SANTANA, J. S.; MORAIS, D. M. F.; VALE, J. A. R.; WANDERLEY, A. A. 2021. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22508>. Acesso: 04 mar. 2025.

CUNHA, T. J.; MENDES, A. M. S.; GIONGO, V. Soil organic matter. In: NUNES, R. R.; REZENDE, M. O. O. (Ed.) **Soil resource: properties and uses**. Editora Cubo, São Carlos, 2015, p. 273-293.

DCA-UFCG, **Precipitação Mensal do Estado da Paraíba: 1911/1990**. Departamento de Ciências Atmosféricas/Universidade Federal de Campina Grande, 2020. Disponível em: <http://www.dca.ufcg.edu.br/clima/chuvapb.htm>. Acesso em: jan. 2022.

DEL RIO, J. C.; MCKINNEY, D. E.; KNICKER, H.; NANNY, M. A.; MINARD, R. D.; HATCHER, P. G. Structural characterization of bio-and geo-macromolecules by off-line thermochemolysis with tetramethylammonium hydroxide. **Journal of Chromatography A**, v. 823, n. 1-2, p. 433-448, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(98\)00268-4](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(98)00268-4).

DICK, D. P.; GONÇALVES, C. N.; DALMOLIN, R. S.; KNICKER, H.; KLAMT, E.; KÖGEL-KNABNER, I.; SIMÕES, M. L.; MARTIN-NETO, L. Characteristics of soil organic matter of different Brazilian Ferralsols under native vegetation as a function of soil depth. **Geoderma**, v. 124, n. 3-4, p. 319-333, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.05.008>.

DIGNAC, M. F.; DERRIEN, D.; BAROT, S.; CÉCILLON, L.; CHENU, C.; CHEVALLIER, T.; FRESCHET, G. T.; GARNIER, P.; GUENET, B.; HEDDE, M.; KLUMPP, K.;

LASHERMES, G.; MARON, P.; NUNA, N.; ROUMET, C.; BASILE-DOELSCH, I. Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review. **Agronomy for sustainable development**, v. 37, p. 1-27, 2017. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0421-2>.

DOVE, N. C.; BARNES, M. E.; MORELAND, K.; GRAHAM, R. C.; BERHE, A. A.; HART, S. C. Depth dependence of climatic controls on soil microbial community activity and composition. **ISME communications**, v. 1, n. 1, p. 78, 2021. <https://doi.org/10.1038/s43705-021-00081-5>.

EMERSON, W. W.; MCGARRY, D. Organic carbon and soil porosity. **Australian Journal of Soil Research**, v. 41, n. 1, p. 107-118, 2003. <https://doi.org/10.1071/SR01064>.

ESCH, E. H.; KING, J. Y.; CLELAND, E. E. Foliar litter chemistry mediates susceptibility to UV degradation in two dominant species from a semi-arid ecosystem. **Plant and Soil**, v. 440, p. 265-276, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04069-y>.

EUROSTAT. **Database**. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home>. Acesso em: 25 mar. 2020.

FABBRI, D.; HELLEUR, B. Characterization of the tetramethylammonium hydroxide thermochemolysis products of carbohydrates. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 49, n. 1-2, p. 277-293, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(98\)00085-0](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(98)00085-0)

FAN, H.; WU, J.; LIU, W.; YUAN, Y.; HU, L.; CAI, Q. Linkages of plant and soil C:N:P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations. **Plant and Soil**, v. 392, p. 127-138, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2444-2>.

FANG, Z.; YU, H.; LI, C.; WANG, B.; HUANG, J. Soil microbial biomass C: N: P stoichiometry is driven more by climate, soil properties and plant traits than by N enrichment in a desert steppe. **Catena**, v. 216, p. 106402, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106402>.

FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A. H. B. M. Cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo. **Embrapa Pantanal**, Corumbá, 2008.

FERRAREZI, R.S.; LIN, X.; NEIRA, A. C. G.; ZAMBON, F. T.; HU, H.; WANG, X.; HUANG, J-H.; FAN, G. Substrate pH Influences the Nutrient Absorption and Rhizosphere Microbiome of Huanglongbing-Affected Grapefruit Plants. **Front. Plant Sci.**, v. 13, 856937, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.856937>.

FILGUEIRAS, T. S.; NOGUEIRA, P. E.; BROCHADO, A. L.; GUALA, G. F. Caminhamento: um método expedito para levantamentos florísticos qualitativos. **Cadernos de geociências**, v. 12, n. 1, p. 39-43, 1994.

FITZSIMONS, J. A.; MICHAEL, D. R. Rocky outcrops: A hard road in the conservation of critical habitats. **Biological Conservation**, v. 211, n. Part B, p. 36-44, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.11.019>.

Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>. Acesso em: 20 set. 2024.

FLOURISH. **Data Visualization & Storytelling**. Disponível em: <https://flourish.studio>. Acesso em: 20 fev. 2023.

FONSECA, J. S.; CAMPOS, M. C. C.; BRITO FILHO, E. G.; MANTOVANELLI, B. C.; SILVA, L. S.; LIMA, A. F. L.; CUNHA, J. M.; SIMÕES, E. L.; SANTOS, L. A. C. Soil-landscape relationship in a sandstone-gneiss topolithosequence in the State of Amazonas, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 80, p. 1-15, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-10026-9>.

FREITAS, A. D. S.; SAMPAIO, E.; SANTOS, C.; SILVA, A.; CARVALHO, R. Fixação biológica de nitrogênio no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, p. 585-597, 2015. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.0.p585-597>.

FREITAS, D. F.; KER, J. C.; SILVA FILHO, L. A.; PEREIRA, T. T. C.; SOUZA, O. F. F.; SCHAEFER, C. E. G. R. Pedogeomorphology and paleoenvironmental implications of large termite mounds at the Brazilian semiarid landscape. **Geomorphology**, v. 387, p. 107762, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107762>.

FUNK, J. L.; LARSON, J. E.; AMES, G. M.; BUTTERFIELD, B. J.; CAVENDER-BARES, J.; FIRN, J.; LAUGHLIN, D. C.; SUTTON-GRIER, A. E.; WILLIAMS, L.; WRIGHT, J. Revisiting the Holy Grail: Using plant functional traits to understand ecological processes. **Biological Reviews**, v. 9, n. 2, p. 1156-1173, 2017. <https://doi.org/10.1111/brv.12275>.

GALINDO, I. C. L.; RIBEIRO, M. R.; SANOTS, M. F. A. V.; LIMA, J. F. W. F.; FERREIRA, R. F. A. L. Relações solo-vegetação em áreas sob processo de desertificação no município de Jataúba, PE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 1283-1296, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300036>.

GAO, D.; BAI, E.; WANG, S.; ZONG, S.; LIU, Z.; FAN, X.; ZHAO, C.; HAGEDORN, F. Three-dimensional mapping of carbon, nitrogen, and phosphorus in soil microbial biomass and their stoichiometry at the global scale. **Global Change Biology**, v. 28, n. 22, p. 6728-6740, 2022. <https://doi.org/10.1111/gcb.16374>.

GELAW, A. M.; SINGH, B. R.; LAL, R. Soil organic carbon and total nitrogen stocks under different land uses in a semi-arid watershed in Tigray, Northern Ethiopia. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 188, p. 256-263, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.02.035>.

GILLINGHAM, P. K.; PALMER, S. C. F.; HUNTLEY, B.; KUNIN, W. E.; CHIPPERFIELD, J. D.; THOMAS, C. D. The relative importance of climate and habitat in determining the

distributions of species at different spatial scales: a case study with ground beetles in Great Britain. **Ecography**, v. 35, n. 9, p. 831-838, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2011.07434.x>.

GLASER, B.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W.; RUIVO, M. D. L. Soil organic matter stability in Amazonian Dark Earths. **Amazonian Dark Earths: Origin Properties Management**, p. 141-158, 2003. https://doi.org/10.1007/1-4020-2597-1_8.

GOIS, L. S. S.; CORRÊA, A. C. B.; MONTEIRO, K. A. Análise Integrada dos Brejos de Altitude do Nordeste do Brasil a partir de Atributos Fisiográficos. **Espaço Aberto**, PPGG-UFRJ, v. 9, n. 2, p. 77-98, 2019. <https://doi.org/10.36403/espacoaberto.2019.28357>.

GOOGLE. **Google Earth Pro**. Disponível em: <https://earth.google.com/web>. Acessado em: 13 mai. 2023.

GRAND, S.; LAVKULICH, L. M. Effects of forest harvest on soil carbon and related variables in Canadian spodosols. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, n. 5, p. 1816-1827, 2012. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0103>.

GREENHALGH, T.; PEACOCK, R. Effectiveness and efficiency of search methods in systematic reviews of complex evidence: audit of primary sources. **BMJ**, v. 331, 1064-1065, 2005. <https://doi.org/10.1136/bmj.38636.593461.68>.

GROHMANN, F. Superfície específica do solo de unidades de mapeamento do estado de São Paulo: II-Influência da matéria orgânica, dos óxidos de ferro livres e dos cátions trocáveis, na superfície específica total do solo. **Bragantia**, v. 31, p. 167-185, 1972.

GRÜNEBERG, E.; ZICHE, D.; WELLBROCK, N. Organic carbon stocks and sequestration rates of forest soils in Germany. **Global change biology**, v. 20, n. 8, p. 2644-2662, 2014. <https://doi.org/10.1111/gcb.12558>.

HAMER, U.; RUMPEL, C.; DIGNAC, M. F. Cutin and suberin biomarkers as tracers for the turnover of shoot and root derived organic matter along a chronosequence of Ecuadorian pasture soils. **European Journal of Soil Science**, v. 63, n. 6, p. 808-819, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01476.x>.

HAMPE, A.; RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, F.; DOBROWSKI, S.; HU, F. S.; GAVIN, D. G. Climate refugia: from the Last Glacial Maximum to the twenty-first century. **New Phytologist**, v. 197, n. 1, p. 16-18, 2013. <https://doi.org/10.1111/nph.12059>.

HANKE, D.; DICK, D. P. Estoque de carbono e mecanismos de estabilização da matéria orgânica do solo: uma revisão. **Revista Científica Agropampa**, v. 2, n. 2, p. 171-190, 2019. Disponível em: <https://periodicos.unipampa.edu.br/index.php/Agropampa/article/view/9681>. Acesso em: 3 abr. 2025.

HATTEN, J.; LILES, G. A 'healthy' balance—The role of physical and chemical properties in maintaining forest soil function in a changing world. In: *Developments in soil science*. **Elsevier**, 2019. p. 373-396. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63998-1.00015-X>.

HECKMAN, K.; THROCKMORTON, H.; HORWATH, W. R.; SWANSTON, C. W.; RASMUSSEN, C. Variation in the molecular structure and radiocarbon abundance of mineral-associated organic matter across a lithosequence of forest soils. **Soil Systems**, v. 2, n. 2, p. 36, 2018. <https://doi.org/10.3390/soilsystems2020036>.

HENDRICKSON, O. Q. Variation in the C:N ratio of substrate mineralized during forest humus decomposition. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 17, issue 4, p. 435-440, 1985. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90005-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90005-7).

HINTON, P. R. *Estatísticas explicadas*. **Routledge**, 2014. <https://doi.org/10.4324/9781315797564>.

HIRMAS, D. R.; GIMÉNEZ, D.; NEMES, A.; KERRY, R.; BRUNSELL, N. A.; WILSON, C. J. Climate-induced changes in continental-scale soil macroporosity may intensify water cycle. **Nature**, v. 561, p. 100-103, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0463-x>.

HOLANDA, A. C.; FELICIANO, A. L. P.; FREIRE, F. J.; SOUSA, F. Q.; FREIRE, S. R. O.; ALVES, A. R. Aporte de serapilheira e nutrientes em uma área de caatinga. **Ciência Florestal**, v. 27, p. 621-633, 2017. <https://doi.org/10.5902/1980509827747>.

HOPPER, S. D. OCBIL theory: towards an integrated understanding of the evolution, ecology and conservation of biodiversity on old, climatic buffered, infertile landscapes. **Plant and Soil**, v. 322, n. ½, p. 49-86, 2009. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0068-0>.

HOULTON, B. Z.; WANG, Y. P.; VITOUSEK, P. M.; FIELD, C. B. A unifying framework for dinitrogen fixation in the terrestrial biosphere. **Nature**, v. 454, n. 7202, p. 327-330, 2008. <https://doi.org/10.1038/nature07028>.

HUDSON, B. D. Soil organic matter and available water capacity. **Journal of soil and water conservation**, v. 49, n. 2, p. 189-194, 1994. <https://doi.org/10.1081/E-ENRL-120049130>.

HUSSAIN, M. B.; AL-HADIDI, S. H.; ERFANIAN, M. B.; YAHIA, M. N. D.; MULLUNGAL, M. N.; ALSAFRAN, M.; BAI, Y.; ALATALO, J. M. Photodegradation and its effect on plant litter decomposition in terrestrial ecosystems: a systematic review. **Soil Systems**, v. 7, n. 1, p. 6, 2023. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010006>.

HUXMAN, T. E.; SNYDER, K. A.; TISSUE, D.; LEFFLER, A. J.; OGLE, K.; POCKMAN, W. T.; SANDQUIST, D. R.; POTTS, D. L.; SCHWINNING, S. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. **Ecology**, v. 141, p. 254-268, 2004. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1682-4>.

IBGE, Coordenação de Recursos Naturais; AMBIENTAIS, Estudos. **Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1: 250 000**. Rio de Janeiro, IBGE, 2019.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geociências » Organização do território » Malhas territoriais » Malha Municipal, 2020**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?edicao=30138>. Acesso em: 4 mar. 2025.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geociências » Organização do território » Malhas territoriais » Malha Municipal, 2022**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?edicao=36516>. Acesso em: 4 mar. 2025.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Geociências > informacoes_ambientais > pedologia em escala de 1:250.000**. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 4 mar. 2025.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Pedologia**. 3ª Ed. Manuais Técnicos em Geociências, nº.4, Rio de Janeiro, 2015, 430p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?id=295017&view=detalhes>. Acesso em: 4 mar. 2025.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **TOPODATA: Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil**. 2008. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/documentos.php>. Acesso em: 4 mar. 2025.

IPCC, 2013. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. Climate Change 2013: **The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 465-570, 2013. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.015>.

IUCN. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. **A working system for classification of world vegetation**. Morges, Switzerland, 1973, p. 23. Available at: <https://portals.iucn.org/library/node/6572>. Access on: 29 March 2025.

IUSS Working Group WRB. **World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps**. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022.

JARVIS, N.; LARSBO, M. Macropores and macropore flow. In: GOSS, M. J.; OLIVER, M. (Eds.) **Encyclopedia of Soils in the Environment (Second Edition)**, Elsevier, p. 306-313, 2023. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00098-7>.

JIA, J.; CAO, Z.; LIU, C.; ZHANG, Z.; LIN, L.; WANG, Y.; HAGHIPOUR, N.; WACKER, L.; BAO, H.; DITTMAR, T.; SIMPSON, M. J.; YANG, H.; CROWTHER, T. W.; EGLINTON, T. I.; HE, J.; FENG, X. Climate warming alters subsoil but not topsoil carbon dynamics in alpine grassland. **Global Change Biology**, v. 25, n. 12, p. 4383-4393, 2019. <https://doi.org/10.1111/gcb.14823>.

JONES, A. R.; DALAL, R. C.; GUPTA, V. V.; SCHMIDT, S.; ALLEN, D. E.; JACOBSEN, G. E.; BIRD, M.; GRANDY, A. S.; SANDERMAN, J. Molecular complexity and diversity of persistent soil organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 184, p. 109061, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109061>.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V. Clima da Região Nordeste do Brasil. In: CAVALCANTI I. F.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Eds.). **Tempo e Clima No Brasil**. 2009, p. 213-234.

KEPPEL, G.; VAN NIEL, K. P.; WARDELL-JOHNSON, G. W.; YATES, C. J.; BYRNE, M.; MUCINA, L.; SCHUT, A. G. T.; HOPPER, S. D.; FRANKLIN, S. E. Refugia: identifying and understanding safe havens for biodiversity under climate change. **Global Ecology and Biogeography**, v. 21, p. 393-404, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00686.x>.

KLEBER, M.; EUSTERHUES, K.; KEILUWEIT, M.; MIKUTTA, C.; MIKUTTA, R.; NICO, P. S. Mineral–organic associations: formation, properties, and relevance in soil environments. **Advances in agronomy**, v. 130, p. 1-140, 2015. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.10.005>.

KLUGE, M.; BRULFERT, J. Ecophysiology of vascular plants on inselbergs. In: POREMBSKI, S.; BARTHLOTT, W. (Eds.) **Inselbergs biotic diversity of isolated rock outcrops in tropical and temperate regions**. Ecological Studies, Springer-Verlag, Berlin, v. 146. 2000, p. 143-176.

KÖCHY, M.; DON, A.; VAN DER MOLEN, M. K.; FREIBAUER, A. Mineral–organic associations: formation, properties, and relevance in soil environments. **Advances in agronomy**, v. 130, p. 1-140, 2015. <https://doi.org/10.5194/soil-1-367-2015>.

KÖGEL-KNABNER, I. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. **Soil biology and biochemistry**, v. 34, n. 2, p. 139-162, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00158-4](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00158-4).

KÖGEL-KNABNER, I.; GUGGENBERGER, G.; KLEBER, M.; KANDELER, E.; KALBITZ, K.; SCHEU, S.; EUSTERHUES, K.; LEINWEBER, P. Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 171, n. 1, p. 61-82, 2008. <https://doi.org/10.1002/jpln.200700048>.

KOLATTUKUDY, P. E. Structure, Biosynthesis, and Biodegradation of Cutin and Suberin. **Annual Review of Plant Biology**, v. 32, p. 539-567, 1981. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.32.060181.002543>.

KRASILNIKOV, P.; GUTIÉRREZ-CASTORENA, M. C.; AHRENS, R. J.; CRUZ-GAISTARDO, C. O.; SEDOV, S.; SOLLEIRO-REBOLLEDO, E. **The soils of Mexico**. Springer Science & Business Media, 2013. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5660-1>.

KULKARNI, A.; SHIGWAN, B. K.; VIJAYAN, S.; WATVE, A.; KARTHICK, B.; DATAR, M. N. Indian rock outcrops: review of flowering plant diversity, adaptations, floristic composition and endemism. **Tropical Ecology**, p. 1-17. 2022. <https://doi.org/10.1007/s42965-022-00283-5>.

LAGES, G. A.; FERREIRA, R. V.; MENESES, L. F.; NASCIMENTO, M. A. L.; FIALHO, D. Projeto Geoparques: Geoparque Cariri Paraibano. **Serviço Geológico do Brasil–CPRM**, 2018. https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/20244/3/rli_geoparque_cariri_paraibano.pdf.

LAGES, G. A.; MARINHO, M. S.; NASCIMENTO, M. A. L.; MEDEIROS, V. C.; DANTAS, E. L. Geocronologia e feições estruturais e petrológicas do Plúton Bravo, Domínio Central da Província Borborema, Nordeste do Brasil: um granito transalcalino inicial no estágio pós-colisional da Orogenia Brasileira. **Brazilian Journal of Geology**, v. 46, p. 41-61, 2016. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620150033>.

LAL, R. Carbon cycling in global drylands. **Current climate change reports**, v. 5, p. 221-232, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40641-019-00132-z>.

LAL, R. Soil organic matter and water retention. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 5, p. 3265-3277, 2020. <https://doi.org/10.1002/agj2.20282>.

LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global change biology**, v. 26, n. 1, p. 261-273, 2020. <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>.

LEHMANN, J.; KLEBER, M. A natureza controversa da matéria orgânica do solo. **Natureza**, v. 528, n. 7580, pág. 60-68, 2015. <https://doi.org/10.1038/nature16069>.

LETZ, O. SIEBNER, H.; AVRAHAMOV, N.; EGOZI, R.; ESHEL, G.; DAHAN, O. The impact of geomorphology on groundwater recharge in a semi-arid mountainous area. **Journal of Hydrology**, v. 603, n. Part C, 127029, p. 1-11, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127029>.

LEUTHOLD, S.; LAVALLEE, J. M.; HADDIX, M. L.; COTRUFO, M. F. Contrasting properties of soil organic matter fractions isolated by different physical separation methodologies. **Geoderma**, v. 445, p. 116870, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116870>.

- LI, X.; CHANG, S. X.; SALIFU, K. F. Soil texture and layering effects on water and salt dynamics in the presence of a water table: a review. **Environmental reviews**, v. 22, n. 1, p. 41-50, 2014. <https://doi.org/10.1139/er-2013-0035>.
- LIANG, C.; AMELUNG, W.; LEHMANN, J.; KÄSTNER, M. Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter. **Global change biology**, v. 25, n. 11, p. 3578-3590, 2019. <https://doi.org/10.1111/gcb.14781>.
- LIANG, C.; SCHIMEL, J. P.; JASTROW, J. D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. **Nature microbiology**, v. 2, n. 8, p. 1-6, 2017. <https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2017.105>.
- LIANG, Y.; RILLIG, M. C.; CHEN, H. Y.; SHAN, R.; MA, Z. Soil pH drives the relationship between the vertical distribution of soil microbial biomass and soil organic carbon across terrestrial ecosystems: A global synthesis. **Catena**, v. 238, p. 107873, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107873>.
- LIMA, G. M. P.; FARIAS, F. F. de; BARBOSA, J. S. F.; GOMES, L. C. C. **Inselberge: Ilhas terrestres**. EDUFBA: Salvador, 2009, 123 p. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/12264>.
- LOCATELLI, J. L.; SANTOS, R. S.; TENELLI, S.; SOARES, M. B.; DEL GROSSO, S.; STEWART, C. E.; POPIN, G. V.; BERTOL, F. D. zen; CARVALHO, J. L. N.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P. Soil carbon allocation, composition, and sequestration changes induced by cropping diversification in tropical systems. **Soil and Tillage Research**, v. 248, p. 106464, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106464>.
- Longbottom, T. L.; Townsend-Small, A.; Owen, L. A.; Murari, M. K. Climatic and topographic controls on soil organic matter storage and dynamics in the Indian Himalaya: Potential carbon cycle-climate change feedbacks. **Catena**, v. 119, p. 125-135, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.03.002>.
- LOPES, S. F.; RAMOS, M. B.; ALMEIDA, G. R. The Role of Mountains as Refugia for Biodiversity in Brazilian Caatinga: Conservationist Implications. **Tropical Conservation Science**, v. 10, p. 1-12, 2017. <https://doi.org/10.1177/1940082917702651>.
- LOPEZ, B. R.; BACILIO, M. Weathering and soil formation in hot, dry environments mediated by plant-microbe interactions. **Biology and Fertility of Soils**, v. 56, n. 4, p. 447-459, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01456-x>.
- LÓPEZ-FANDO, C.; PARDO, M. T. Soil carbon storage and stratification under different tillage systems in a semi-arid region. **Soil and Tillage Research**, v. 111, n. 2, p. 224-230, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.10.011>.
- LOREAU, M. Biodiversity and ecosystem functioning: Recent theoretical advances. **Oikos**, v. 91, n. 1, p. 3-17, 2000. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2000.910101.x>.

LOURENÇO, E. R. C.; SOUZA, B. I.; D'ANDREA, A. F.; SOUZA, J. J. L. L. Temporal variation of soil CO₂ emission in different land uses in the Caatinga. **Applied Geography**, v. 140, p. 102661, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102661>.

LUGATO, E.; LAVALLEE, J. M.; HADDIX, M. L.; PANAGOS, P.; COTRUFO, M. F. Different climate sensitivity of particulate and mineral-associated soil organic matter. **Nature Geoscience**, v. 14, n. 5, p. 295-300, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00744-x>.

LUNGUINHO, R. **Nos caminhos dos relevos residuais contribuição à ecohidrologia de encostas no semiárido brasileiro**. 2018. 267 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal da Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Geografia. João Pessoa, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/13602>.

LYU, M.; HOMYAK, P. M.; XIE, J.; PEÑUELAS, J.; RYAN, M. G.; XIONG, X.; SARDANS, J.; LIN, W.; WANG, M.; CHEN, G.; YANG, Y. Litter quality controls tradeoffs in soil carbon decomposition and replenishment in a subtropical forest. **Journal of Ecology**, v. 111, p. 2181-2193, 2023. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14167>.

MACEDO, R. S.; MORO, L.; LAMBAIS, É. O.; LAMBAIS, G. R.; BAKKER, A. P. D. Effects of degradation on soil attributes under Caatinga in the Brazilian semi-arid. **Revista Árvore**, v. 47, p. e4702, 2023. <https://doi.org/10.1590/1806-9088202300000002>.

MAIA, R. P.; BEZERRA, F. H. R.; NASCIMENTO, M. A. L.; CASTRO, H. S.; MEIRELES, A. J. A.; ROTHIS, L. M. Geomorfologia do campo de inselbergues de Quixadá, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, n. 2, p. 239-253. 2015. <https://doi.org/10.20502/rbg.v16i2.651>.

MAIA, R. P.; NASCIMENTO, M. A. L. Relevos graníticos do Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 2, 2018. <https://doi.org/10.20502/rbg.v19i2.1295>.

MANZONI, S.; COTRUFO, M. F. Mechanisms of soil organic carbon and nitrogen stabilization in mineral-associated organic matter—insights from modeling in phase space. **Biogeosciences**, v. 21, n. 18, p. 4077-4098, 2024. <https://doi.org/10.5194/bg-21-4077-2024>.

MARSCHNER, P. Processes in submerged soils—linking redox potential, soil organic matter turnover and plants to nutrient cycling. **Plant and Soil**, v. 464, n. 1, p. 1-12, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05040-6>.

MATMON, A.; MUSHKIN, A.; ENZEL, Y.; GRODEK, T.; ARNOLD, M.; AUMAÎTRE, G.; BOURLÈS, D.; KEDDADOUCHE, K. Erosion of a granite inselberg, Gross Spitzkoppe, Namib Desert. **Geomorphology**, v. 201, p. 52–59, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.06.005>.

MELO, A. F. D.; SOUZA, C. M. M.; REGO, L. G. S.; LIMA, R. N. S.; MOURA, I. N. B. M. Pedogênese de chernossolos derivados de diferentes materiais de origem no oeste

potiguar. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 13, n. 3, p. 229-235, 2017. <https://doi.org/10.30969/acsa.v13i3.890>.

MENEZES, R.; SAMPAIO, E.; GIONGO, V.; PÉREZ-MARIN, A. Ciclagem biogeoquímica em ecossistemas terrestres do Bioma Caatinga. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, p. 643-653, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000400004>.

MEYER, N.; KUHWALD, M.; PETERSEN, J. F.; DUTTMANN, R. Soil development in weathering pits of a granitic dome (Enchanted Rock) in central Texas. **Catena**, v. 199, p. 105084, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105084>.

MIGOÑ, P. **Granite landscapes of the world**. Oxford, UK: Oxford University Press. 2006. p. 416. <https://doi.org/10.1093/oso/9780199273683.001.0001>.

MIGOÑ, P.; MAIA, R. P. Pedra da Boca, Pai Mateus, and Quixadá—three possible key geoheritage sites in Northeast Brazil. **Geoheritage**, v. 12, n. 3, p. 51, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12371-020-00473-4>.

MIKHAILOVA, E. A.; ZURQANI, H. A.; POST, C. J.; SCHLAUTMAN, M. A.; POST, G. C. Soil Diversity (Pedodiversity) and Ecosystem Services. **Land**, v. 10, n. 288, p. 1-34, 2021. <https://doi.org/10.3390/land10030288>.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 39-47, 2018. <https://doi.org/10.1111/ejss.12475>.

MORO, M. F.; AMORIM, V. O.; QUEIROZ, L. P.; COSTA, L. R. F.; MAIA, R. P.; TAYLOR, N. P.; ZAPPI, D. C. Biogeographical districts of the Caatinga dominion: a proposal based on geomorphology and endemism. **The Botanical Review**, v. 90, n. 4, p. 376-429, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12229-024-09304-5>.

MOTZKIN, G.; WILSON, P.; FOSTER, D. R.; ALLEN, A. Vegetation patterns in heterogeneous landscapes: The importance of history and environment. **Journal of Vegetation Science**, v. 10, n. 6, p. 903-920, 1999. <https://doi.org/10.2307/3237315>.

MURPHY, B. W. Impact of soil organic matter on soil properties - a review with emphasis on Australian soils. **Soil Research**, v. 53, n. 6, p. 605-635, 2015. <https://doi.org/10.1071/SR14246>.

NACE, T. E.; BAKER, P. A.; DWYER, G. S.; SILVA, C. G.; RIGSBY, C. A.; BURNS, S. J.; GIOSAN, L.; OTTO-BLIESNER, B.; LIU, Z.; ZHU, J. The role of North Brazil Current transport in the paleoclimate of the Brazilian Nordeste margin and paleoceanography of the western tropical Atlantic during the late Quaternary. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 415, p. 3-13, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.05.030>.

NASCIMENTO, M. A. L.; GALINDO, A. C.; MEDEIROS, V. C. Ediacaran to Cambrian magmatic suites in the Rio Grande do Norte domain, extreme Northeastern Borborema Province (NE of Brazil): Current knowledge. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 58, p. 281-299, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.09.008>.

NASCIMENTO, S. S.; LIMA, E. R. V.; LIMA, P. P. S. Análise temporal da degradação da Caatinga na Sub-Bacia do Alto Paraíba. **OKARA**, v. 8, n.1, p. 72–93, 2014.

NEAL, J.; HAWKER, L. **FABDEM V1-2**. 2023. <https://doi.org/10.5523/bris.s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn>.

NOVELLO, V. F.; CRUZ, F. W.; KARMANN, I.; BURNS, S. J.; STRÍKIS, N. M.; VUILLE, M.; CHENG, H.; LAWRENCE EDWARDS, R.; SANTOS, R. V.; FRIGO, E.; BARRETO, E. A. S. Multidecadal climate variability in Brazil's Nordeste during the last 3000 years based on speleothem isotope records. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 23, L23706, p. 6 2012. <https://doi.org/10.1029/2012GL053936>.

NOY-MEIR, I. Desert ecosystems: environment and producers. **Annual review of ecology and systematics**, p. 25-51, 1973. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000325>.

OLIVEIRA FILHO, J. S.; BARROZO, M. V. S.; PEREIRA, M. G. Environmental factors and land use changes controlling the availability of phosphorus in dryland soils. **Jornal de Ambientes Áridos**, v. 202, p. 104770, 2022a. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104770>.

OLIVEIRA FILHO, J. S.; DINIZ, R. S. N.; SILVA, R. C.; MOREIRA, V. O. G.; VIEIRA, J. M.; BARRETO, M. M. S.; CARVALHO, M. S. B. S.; TRITSCH, I.; SCOPEL, E. Carbon and nitrogen stocks in Lithic soils: Environmental drivers and land-use implication in Brazilian dry ecosystems. **Journal of Soils and Sediments**, v. 24, n. 4, p. 1476-1488, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11368-024-03732-x>.

OLIVEIRA FILHO, J. S.; LOPES, R. O.; ARAÚJO, M. O.; MAGALHÃES, M. S.; DAYSON VASCONCELOS, M. D. S.; LIMA, A. R. L.; BASTOS, F. H.; GERVASIO PEREIRA, M. How does increasing humidity in the environment affect soil carbon and nitrogen stocks and the C/N ratio in tropical drylands? Evidence from northeastern Brazil. **Catena**, v. 213, p. 106208, 2022b. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106208>.

OLIVEIRA, A. N.; OLIVEIRA, L. A.; ANDRADE, J. S.; CHAGAS JUNIOR, A. F. Enzimas hidrolíticas extracelulares de isolados de rizóbia nativos da Amazônia Central, Amazonas, Brasil. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612006000400022>.

OLIVEIRA, L. B.; FONTES, M. P. F.; RIBEIRO, M. R.; KER, J. C. Micromorfologia e gênese de luvisolos e planossolos desenvolvidos de rochas metamórficas no semi-árido brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2407-2423, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000600019>.

OLIVEIRA, L. B.; FONTES, M. P. F.; RIBEIRO, M. R.; KER, J. C. Morfologia e classificação de Luvisolos e Planossolos desenvolvidos de rochas metamórficas no semiárido do nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, 2009, p. 1333-1345. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000500026>.

OLIVEIRA, R. B.; GODOY, S. A. P. Floristic composition of the rocky outcrops of Morro do Forno, São Paulo. **Biota Neotropica**, v. 7, n. 2, p. 37-48, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1676-06032007000200004>.

OLIVEIRA, R. G. **Arcabouço geofísico, isostasia e causas do magmatismo cenozóico da província Borborema e de sua margem continental (Nordeste do Brasil)**. 415 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica; Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

ORNDUFF, R. **Islands on Islands: Plant Life on the Granite Outcrops of Western Australia**. University of Hawaii, Honolulu. 1987.

OTTAVIANI, G.; MARCANTONIO, M.; MUCINA, L. Soil depth shapes plant functional diversity in granite outcrops vegetation of Southwestern Australia. **Plant Ecology & Diversity**, v. 9, n. 3, p. 263-276, 2016. <https://doi.org/10.1080/17550874.2016.1211192>.

PACHECO, A. A.; KER, J. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FONTES, M. P. F.; ANDRADE, F. V.; MARTINS, E. S.; OLIVEIRA, F. S. Mineralogy, micromorphology, and genesis of soils with varying drainage along a hillslope on granitic rocks of the Atlantic Forest Biome, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, p. e0170291, 2018. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170291>.

PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T. C.; MULROW, C. D.; SHAMSEER, L.; TETZLAFF, J. M.; AKL, E. A.; BRENNAN, S. E.; CHOU, R.; GLANVILLE, J.; GRIMSHAW, J. M.; HRÓBJARTSSON, A.; LALU, M. M.; LI, T.; LODER, E. W.; MAYO-WILSON, E.; MCDONALD, S.; MCGUINNESS, L. A.; STEWART, L. A.; THOMAS, J.; TRICCO, A. C.; WELCH, V. A.; WHITHING, P.; MOHER, D. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, v. 372, n. 71, p. 1-9, 2021. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.

PARMENTIER, I. Study of the vegetation composition in three inselbergs from continental equatorial guinea (western central Africa): effects of site, soil factors and position relative to forest fringe. **Belgian Journal of Botany**, v. 136, n. 1, p. 63-72, 2003. Available at: <https://www.jstor.org/stable/20794516>. Access on: 29 March 2025.

PARMENTIER, I.; STÉVART, T.; HARDY, O. J. The inselberg flora of Atlantic Central Africa. I. Determinants of species assemblages. **Journal of biogeography**, v. 32, p. 685-696, 2005. Available at: <https://www.jstor.org/stable/3566218>. Access on: 29 March 2025.

PEBERDY, J. F. Fungal Cell Walls - A Review. In: KUHN, P. J.; TRINCI, A. P. J.; JUNG, M. J.; GOOSEY, M. W.; COPPING, L. G. (eds). **Biochemistry of Cell Walls and**

Membranes in Fungi. Springer, Berlin, Heidelberg. 1990. https://doi.org/10.1007/978-3-642-74215-6_2.

PENNELL, K. D.; ABRIOLA, L. M.; BOYD, S. A. Área de superfície de matéria orgânica do solo reexaminada. **Soil Science Society of America Journal**, v. 59, n. 4, p. 1012-1018, 1995. <https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900040008x>.

PÉREZ, F. L. Geocology of a granite dome: Spatial interactions between gnammas, rills, soils, and plant cover, Enchanted Rock (Texas, USA). **Catena**, v. 223, p. 106938, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106938>.

PHAM, M. T.; RAJIĆ, A.; GREIG, J. D.; SARGEANT, J. M.; PAPADOPOULOS, A.; MCEWEN, S. A. A scoping review of scoping reviews: advancing the approach and enhancing the consistency. **Res Synth Methods**, v. 5, n. 4, p. 371-385, 2014. <https://doi.org/10.1002/jrsm.1123>.

PICCOLO, A.; DROSOS, M. Chapter Seven - The supramolecular structure of the soil humeome and significance of humification. **Advances in Agronomy**, v. 188, p. 405, 2024. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2024.06.006>.

PIRES, C. V.; SCHAEFER, C. E. R. G.; HASHIGUSHI, A. K.; THOMAZINI, A.; FILHO, E. I. F.; MENDONÇA, E. S. Soil organic carbon and nitrogen pools drive soil C-CO₂ emissions from selected soils in Maritime Antarctica. **Science of the Total Environment**, v. 596, p. 124-135, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.144>.

PLAZA, C.; ZACCONE, C.; SAWICKA, K.; MÉNDEZ, A. M.; TARQUIS, A.; GASCÓ, G.; HEUVELINK, G. B. M.; SCHUUR, E. A. G.; MAESTRE, F. T. Soil resources and element stocks in drylands to face global issues. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 13788, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32229-0>.

POREMBSKI, S. Tropical inselbergs: habitat types, adaptive strategies and diversity patterns. **Brazilian Journal of Botany**, v. 30, n. 4, p. 579-586, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-84042007000400004>.

POREMBSKI, S.; BARTHLOTT, W. **Inselbergs: Biotic Diversity of Isolated Rock Outcrops in Tropical and Temperate Regions**. Ecological Studies. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. 2000. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-59773-2>.

POREMBSKI, S.; MARTINELLI, G.; OHLEMÜLLER, R.; BARTHLOTT, W. Diversity and ecology of saxicolous vegetation mats on inselbergs in the Brazilian Atlantic rainforest. **Diversity and Distributions**, v. 4, n. 3, p. 107-119, 1998. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.1998.00013.x>.

POREMBSKI, S.; SEINE, R.; BARTHLOTT, W. Factors controlling species richness of inselbergs. In: POREMBSKI, S.; BARTHLOTT, W. (Eds.) **Inselbergs biotic diversity of isolated rock outcrops in tropical and temperate regions**. Ecological Studies, Springer-Verlag, Berlin, v. 146. 2000, p. 451-481.

PRADO, D. E. Seasonally dry forests of tropical south america: from forgotten ecosystems to a new phytogeographic unit. **Edinburgh Journal of botany**, v. 57, n. 3, p. 437-461, 2000. <https://doi.org/10.1017/S096042860000041X>.

PRIMO, A. A.; LUSTOSA FILHO, J. F.; MAROTA, H. B.; TONUCCI, R. G.; SILVA, I. R.; OLIVEIRA, T. S. Different composition of plant residues as a driver of microbial community structure and soil organic matter composition: A microcosm study. **Pedobiologia**, v. 106, p. 150985, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2024.150985>.

QIU, Y.; ZHANG, K.; ZHAO, Y.; ZHAO, Y.; WANG, B.; WANG, Y.; HE, T.; XU, X.; BAI, T.; ZHANG, Y.; HU, S. Climate warming suppresses soil abundant fungal taxa and reduces soil carbon efflux in a semi-arid grassland. **bioRxiv**, p. 2023.10. 08.561373, 2023. <https://doi.org/10.1101/2023.10.08.561373>.

QUEIROZ, A. F.; SALVIANO, A. M.; CUNHA, T. J. F.; OLSZEWSKI, N.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; OLIVEIRA NETO, M. B. Potentialities and limitations of agricultural use in soils of semi-arid region of the state of Bahia. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, p. 3373-3387, 2018. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201820180029>.

QUEIROZ, L. P.; CARDOSO, D.; FERNANDES, M. F.; MORO, M. F. Diversity and evolution of flowering plants of the Caatinga domain. **Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America**, p. 23-63, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68339-3_2.

QUEIROZ, R. T.; SOUZA, B. I.; SOUZA, J. J. L. L.; MEDEIROS, J. R.; FONSECA, C. F.; CARDOSO, E. C. M. Extending the limits of Campos Rupestres in Brazil. **Caminhos Geografia**, v. 22, p. 115-137, 2021. <https://doi.org/10.14393/rcg228255806>.

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLÜTER, S.; VOGEL, H. J. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v. 314, p. 122-137, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>.

RAFIEE, F.; EJTEHADI, H.; FARZAM, M.; ZARE, H.; BASHIRZADEH, M. Changes in plant biodiversity facets of rocky outcrops and their surrounding rangelands across precipitation and soil gradients. **Scientific Reports**, v. 12, p. 1-11, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13123-2>.

RAWLS, W. J.; PACHEPSKY, Y. A.; RITCHIE, J. C.; SOBECKI, T. M.; BLOODWORTH, H. Effect of soil organic carbon on soil water retention. **Geoderma**, v. 116, n. 1-2, p. 61-76, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00094-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00094-6).

REMPFERT, K. R.; BELL, S. L.; KASANKE, C. P.; ZHAO, Q.; ZHAO, X.; LIPTON, A. S.; HOFMOCKEL, K. S. Biomolecular budget of persistent, microbial-derived soil organic carbon: The importance of underexplored pools. **Science of the Total Environment**, v. 932, p. 172916, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172916>.

ROWLEY, M. C.; VERRECCHIA, É. P. Estabilização mediada por cálcio do carbono orgânico do solo. **Biogeochemistry**, v. 137, n. 1, p. 27-49, 2018. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(03\)81004-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(03)81004-0).

SALGADO, A. A. R.; BUENO, G. T.; DINIZ, A. D.; MARENT, B. R. Long-term geomorphological evolution of the Brazilian territory. **Landscapes and landforms of Brazil**, p. 19-31, 2015. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8023-0_3.

SALVADOR, M. S. S.; BERNADO, I. E. S.; LIMA, V. R. P.; BORGES NETO, I. O. Floristic diversity in Lajedo do Bravo, Cariri paraibano. **Revista Geotemas**, v. 13, p. e02328-e02328, 2023. <https://doi.org/10.33237/2236-255X.2023.5137>.

SANTANA, M. O. **Atlas das áreas susceptíveis à desertificação do Brasil**. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2007. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000159542>. Acesso em: 4 mar. 2025.

SANTOS, H. G.; CARVALHO JUNIOR, W.; DART, R. O.; AGLIO, M. L. D.; SOUZA, J. S.; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTINS, A. L. S.; OLIVEIRA, A. P. O Novo Mapa de Solos do Brasil Legenda Atualizada escala 1:5.000.000. **Embrapa Solos**, Rio de Janeiro. 2011.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. Sistema brasileiro de classificação de solos, 5. ed. **Revista e Ampliada Embrapa**, Brasília, DF, 2018.

SANTOS, J. C.; LEAL, I. R.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S.; FERNANDES, G. W.; TABARELLI, M. Caatinga: the scientific negligence experienced by a dry tropical forest. **Tropical Conservation Science**, v. 4, n. 3, 2011, p. 276–286. <https://doi.org/10.1177/194008291100400306>.

SARKAR, B.; SINGH, M.; MANDAL, S.; CHURCHMAN, G. J.; BOLAN, N. N. Clay minerals—Organic matter interactions in relation to carbon stabilization in soils. In: The future of soil carbon. **Academic Press**, 2018. p. 71-86. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811687-6.00003-1>.

SARTHOU, C.; PAVOINE, S.; GASC, J. P. D.; MASSARY, J. C.; PONGE, J. F. From inselberg to inselberg: Floristic patterns across scales in French Guiana (South America). **Flora**, v. 229, p. 147-158, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2017.02.025>.

SCHELLEKENS, J.; JUSTI, M.; MACEDO, R.; CALEGARI, M. R.; BUURMAN, P.; KUYPER, T. W.; CAMARGO, P. B.; VIDAL-TORRADO, P. Long-term carbon storage in Brazilian Cerrado soils—a conjunction of wildfires, bioturbation, and local edaphic controls on vegetation. **Plant and Soil**, v. 484, n. 1, p. 645-662, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05824-4>.

SCHMALHOLZ, M.; HYLANDER, K. Microtopography creates small-scale refugia for boreal forest floor bryophytes during clear-cut logging. **Ecography**, v. 34, n. 4, p. 637-648, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2010.06652.x>.

SCHUT, A. G. T.; WARDELL-JOHNSON, G. W.; YATES, C. J.; KEPPEL, G.; BARAN, I.; FRANKLIN, S. E.; HOPPER, S. D.; VAN NIEL, K. P.; MUCINA, L.; BYRNE, M. Rapid Characterisation of Vegetation Structure to Predict Refugia and Climate Change Impacts across a Global Biodiversity Hotspot. **PLoS ONE**, v. 9, n. 1, e82778, p. 1-15, 2014. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082778>.

SILVA NETO, E. C.; COELHO-JUNIOR, M. G.; HORÁK-TERRA, I.; GONÇALVES, T. S.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G. Organic soils: formation, classification and environmental changes records in the highlands of southeastern Brazil. **Sustainability**, v. 15, n. 4, p. 3416, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15043416>.

SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; ANDRADE, C. A.; MARTIN-NETO, L.; BETTIOL, W. Matéria orgânica do solo: ciclo, compartimentos e funções. In: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN NETO, L.; ANDRADE, C. A. (Eds.). **Entendendo a Matéria Orgânica Do Solo Em Ambientes Tropical e Subtropical**. Embrapa, Brasília, 2023. p. 17-47.

SILVA, D. F.; ARAUJO, A. S.; LIMA, A. Y.; MOTA, J. C.; NASCIMENTO, Í. V.; QUEIROZ, A. S.; MEDEIROS, E. V.; COSTA, D. P.; MELO, V. M. M.; CARDOSO, E. J. B. N.; VERMA, J. P.; SMITH, G. R.; MENDES, L. W.; PEREIRA, A. P. Enzymatic stoichiometry in degraded soils after two decades of restoration in a Brazilian semiarid region. **Catena**, v. 236, p. 107768, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107768>.

SILVA, D. G.; CORRÊA, A. C. B. Evolução paleoambiental dos depósitos de tanques em Fazenda Nova, Pernambuco–Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, n. 2, p. 43-56, 2009. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/232639>. Acesso em: 11 mar. 2025.

SILVA, H. F.; SOUSA, P. V. F.; ESCOBAR, M. E. O.; OLIVEIRA, T. S. Changes in the composition of soil organic matter caused by organic and conventional management in the long term. **Journal of Environmental Management**, v. 374, p. 124018, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.124018>.

SILVA, J. B. A vegetation overview on rocky outcrops in Brazil. **Oecol. Aust.**, v. 20, n. 3, p. 451-463, 2016. <https://doi.org/10.4257/oeco.2016.2004.05>.

SILVA, J. M. C.; BARBOSA, L. C. F.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. The Caatinga: Understanding the Challenges. In: SILVA, J. M. C.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. (eds.). **The Largest Tropical Dry Forest Region in South America**. Springer, Cham, 2017, p. 3-19. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68339-3_1.

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, v. 241, p. 155-176, 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>.

SKUJINŠ, J. Nitrogen cycling in arid ecosystems. **Ecological Bulletins**, p. 477-491, 1981.

SOKOL, N. W.; WHALEN, E. D.; JILLING, A.; KALLENBACH, C.; PETT-RIDGE, J.; GEORGIU, K. Global distribution, formation and fate of mineral-associated soil organic matter under a changing climate: A trait-based perspective. **Functional Ecology**, v. 36, n. 6, p. 1411-1429, 2022. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.14040>.

SOLLINS, P.; CALDWELL, B. A. Estabilização e desestabilização da matéria orgânica do solo: mecanismos e controles. **Geoderma**, v. 74, n. 1-2, p. 65-105, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(96\)00036-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(96)00036-5).

SOUZA, A. S. V.; MAIA, R. P.; BEZERRA, F. H.; MIGOÑ, P.; SIAME, L. L. Granitic inselberg erosion controlled by dike swarm array in semiarid Brazil. **Geomorphology**, v. 440, p. 108865, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108865>.

SOUZA, B. I.; MENEZES, R.; ARTIGAS, R. C. Efeitos da desertificação na composição de espécies do bioma Caatinga, Paraíba/Brasil. **Investigaciones geográficas**, n. 88, p. 45-59, 2015. <https://doi.org/10.14350/rig.44092>.

SOUZA, B. I.; SOUZA, R. S. Processo de ocupação dos Cariris Velhos–PB e efeitos na cobertura vegetal: contribuição à Biogeografia Cultural do semiárido. **Caderno de Geografia**, v. 26, n. 2, p. 229-258, 2016. <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2016v26nesp2p229>.

SOUZA, J. J. L. L.; CASTRO, F. E.; ANDRADE, C. V. P. A.; KER, J. C.; PEREZ FILHO, A. Brazilian semiarid soils formed during the last glacial maximum. **Catena**, v. 223, p. 106899, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106899>.

SOUZA, J. J. L. L.; MEDEIROS, V. B.; OLIVEIRA, P. E.; SOUZA, B. I.; BARRETO, A. M. F.; OLIVEIRA, É. V.; PESSEDA, L. C. R. Vegetable coverage, anthropogenic action, and paleoclimates in the Caatinga. **Mercator (Fortaleza)**, v. 22, p. e22011, 2023. <https://doi.org/10.4215/rm2023.e22011>.

SOUZA, J. J. L. L.; SOUZA, B. I.; XAVIER, R. A.; CARDOSO, E. C. M.; MEDEIROS, J. R.; FONSECA, C. F.; SCHAEFER, C. E. G. R. Organic carbon rich-soils in the brazilian semiarid region and paleoenvironmental implications. **Catena**, v. 212, p. 106101, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106101>.

SOUZA, J. J. L. L.; SOUZA, B. I.; XAVIER, R. A.; PACHECO, A. A.; PESSEDA, L. C. R.; BRITO, E. S. Archaeoanthrosol formation in the Brazilian semiarid. **Catena**, v. 193, p. 104603, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104603>.

SOUZA, N. R. L.; LIMA, V. R. P.; XAVIER, R. A. Mapeamento e caracterização de trilhas na Fazenda Salambaia como subsídio ao desenvolvimento do Geoturismo e da Geoconservação no semiárido paraibano. **Revista da ANPEGE**, v. 18, n. 36, p. 76-97, 2022. <https://doi.org/10.5418/ra2022.v18i36.15922>.

SOUZA, N. R. L.; XAVIER, R. A.; BORGES NETO, I. O. Geodiversidade e Patrimônio Geomorfológico do Plúton Bravo no semiárido paraibano. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 25, n. 1, 2024. <https://doi.org/10.20502/rbgeomorfologia.v25i1.2460>.

SOUZA, N. R. L.; XAVIER, R. A.; A importância dos “lajedos” na paisagem geomorfológica do Cariri paraibano. In: XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, Instituto de Geociências – Unicamp, Campinas (SP), de 28 de junho a 02 de julho de 2017. **Anais [...]**, Campinas, 2017.

SPEZIALE, K. L.; EZCURRA, C. Rock outcrops as potential biodiversity refugia under climate change in North Patagonia. **Plant Ecology & Diversity**, v. 8, n. 3, p. 353-361, 2014. <https://doi.org/10.1080/17550874.2014.983200>.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. John Wiley & Sons, 1994.

STEWART, B. A.; LAL, R. Managing water to enhance global cereal yields. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 73, n. 2, p. 49A-52A, 2018. <https://doi.org/10.2489/jswc.73.2.49A>.

SZARZYNSKI, J. Xeric islands: environmental conditions on inselbergs. In: POREMBSKI, S.; BARTHLOTT, W. (Eds.) **Inselbergs biotic diversity of isolated rock outcrops in tropical and temperate regions**. Ecological Studies. Springer-Verlag, Berlin, v. 146, 2000. p. 37-48.

TADINI, A. M.; GORANOV, A. I.; MARTIN-NETO, L.; BERNARDI, A. C.; OLIVEIRA, P. P.; PEZZOPANE, J. R.; HATCHER, P. G. Structural characterization using 2D NMR spectroscopy and TMAH-GC × GC-MS: Application to humic acids from soils of an integrated agricultural system and an Atlantic native forest. **Science of the total environment**, v. 815, p. 152605, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152605>.

TADINI, A. M.; NICOLODELLI, G.; SENESI, G. S.; ISHIDA, D. A.; MONTES, C. R.; LUCAS, Y.; MOUNIER, S.; GUIMARÃES, F. E. G.; MILORI, D. M. B. P. Soil organic matter in podzol horizons of the Amazon region: Humification, recalcitrance, and dating. **Science of the Total Environment**, v. 613, p. 160-167, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.068>.

TAN, Z. X.; LAL, R.; SMECK, N. E.; CALHOUN, F. G. Relationships between surface soil organic carbon pool and site variables. **Geoderma**, v. 121, n. 3-4, p. 187-195, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.11.003>.

TANAKA, R. T.; WEBER, O. L. D. S.; TORRES, G. N.; MIRANDA, J. G. D.; COUTO, E. G. Soil aggregation and organic carbon under different management systems in the cerrado of Mato Grosso. **Revista Caatinga**, v. 38, p. e12508, 2024. <https://doi.org/10.1590/1983-21252025v3812508rc>.

TANG, X.; HU, J.; LU, Y.; QIU, J.; DONG, Y.; LI, B.; Soil C, N, P stocks and stoichiometry as related to land use types and erosion conditions in lateritic red soil region, south China. **Catena**, v. 210, p. 105888, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105888>.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Revista e Ampliada Embrapa, Brasília, DF. 2017, p. 574.

TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M. S. P.; BARBOSA, A. A.; RODRIGUEZ, D. A.; OLIVEIRA SANTANA, M.; SESTINI, M. F. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000-2016. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 73, p. 197-206, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.012>.

TORMENA, C. A.; SÁ, J. C. M.; FIGUEIREDO, G. C.; SEVERIANO, E. C.; GUIMARÃES, R. M. L.; LIMA, R. P. Relações da matéria orgânica com atributos físicos de solos de regiões subtropicais e tropicais brasileiras. In: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN NETO, L.; ANDRADE, C. A. (Eds.), **Entendendo a Matéria Orgânica Do Solo Em Ambientes Tropical e Subtropical**. Embrapa, Brasília. 2023.

TWIDALE, C. R. Granite Landforms. **Elsevier Scientific Publishing Co.**, Amsterdam, 1982, p. 372.

TWIDALE, C. R. The two-stage concept of landform and landscape development involving etching: origin, development and implications of an idea. **Earth-Science Reviews**, v. 57, n. 1-2, p. 37-74, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00059-9](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00059-9).

TWIDALE, C. R.; BOURNE, J. A. Rock basins (gnammas) revisited. **Géomorphologie: relief, processus, environnement**, v. 24, n. 2, p. 139-149, 2018. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11880>.

TWIDALE, C. R.; ROMANI, J. R. V. **Landforms and Geology of Granite Terrains**. Taylor & Francis Group plc, London, UK, 2005. p. 330.

USSIRI, D. A.; LAL, R.; USSIRI, D. A.; LAL, R. The Global Carbon Inventory. In: **Carbon Sequestration for Climate Change Mitigation and Adaptation**. Springer, p. 77-102, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53845-7_4.

VANSCHOENWINKEL, B.; PAULA, L. F. A.; SNOEKS, J. M.; VAN DER STOCKEN, T.; BUSCHKE, F. T.; POREMBSKI, S.; SILVEIRA, F. A. O. The ecological and evolutionary dynamics of inselbergs. **Biological Reviews**, v. 100, n. 2, p. 481-507, 2025. <https://doi.org/10.1111/brv.13150>.

WANG, Q.; PIERISTÈ, M.; LIU, C.; KENTA, T.; ROBSON, T. M.; KUROKAWA, H. The contribution of photodegradation to litter decomposition in a temperate forest gap and understorey. **New Phytologist**, v. 229, n. 5, p. 2625-2636, 2021. <https://doi.org/10.1111/nph.17022>.

WANG, Q.; SHIXIONG, L.; ZENGCHUN, J.; WENYING, W. Response of carbon and nitrogen content in plants and soils to vegetation cover change in alpine Kobresia meadow of the source region of Lantsang, Yellow and Yangtze Rivers. **Acta Ecologica Sinica**, v. 28, n. 3, p. 885-894, 2008. [https://doi.org/10.1016/S1872-2032\(08\)60031-1](https://doi.org/10.1016/S1872-2032(08)60031-1).

WANG, X.; WANG, C.; FAN, X.; SUN, L.; SANG, C.; WANG, X.; ... & BAI, E. Mineral composition controls the stabilization of microbially derived carbon and nitrogen in soils: Insights from an isotope tracing model. **Global Change Biology**, v. 30, n. 1, p. e17156, 2024. <https://doi.org/10.1111/gcb.17156>.

WILLARD, S. J.; LIANG, G.; ADKINS, S.; FOLEY, K.; MURRAY, J.; WARING, B. Land use drives the distribution of free, physically protected, and chemically protected soil organic carbon storage at a global scale. **Global Change Biology**, v. 30, n. 9, p. e17507, 2024. <https://doi.org/10.1111/gcb.17507>.

WITZGALL, K.; VIDAL, A.; SCHUBERT, D. I.; HÖSCHEN, C.; SCHWEIZER, S. A.; BUEGGER, F.; POUTEAU, V.; CHENU, C.; MUELLER, C. W. Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon. **Nature communications**, v. 12, n. 1, p. 4115, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24192-8>.

WOSTEN, J. H. M.; GROENENDIJK, P.; VERAART, J. A.; VAN DER LUGT, L. M. **Soil organic matter and its importance for water management**. Stowa, 2019.

XAVIER, R. A. BORGES NETO, I. O.; CUNHA, L. Geodiversidade e Patrimônio Geomorfológico no Cariri Paraibano: A importância dos relevos graníticos. In: SOUZA, B. I.; CUNHA, L.; JACINTO, R.; SUERTEGARAY, D. M. A. (Orgs.) – **Diálogos temáticos e [trans]territoriais: geodiversidade, recursos e patrimônio natural da Caatinga (PB) ao Pampa (RS)**. Compasso Lugar-Cultura, Porto Alegre-RS, 2021, p. 235-254.

XAVIER, R. A. Processos geomorfológicos e evolução da paisagem no semiárido brasileiro. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 7, n. 1, p. 59-69, 2021. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n1ID20692>.

XIA, Q.; RUFTY, T.; SHI, W. Soil microbial diversity and composition: Links to soil texture and associated properties. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 149, 107953, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107953>.

XIAO, L.; YANG, H.; SUN, B.; LI, X.; GUO, J. Stable isotope compositions of recent e fossil sun/shade leaves e implications for palaeoenvironmental reconstruction. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 190, p. 75-84, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2012.10.002>.

YADAV, R. S.; YADAV, B. L.; CHHIPA, B. R. Litter dynamics and soil properties under different tree species in a semi-arid region of Rajasthan, India. **Agroforestry systems**, v. 73, p. 1-12, 2008. <https://doi.org/10.1007/s10457-008-9106-9>.

YAIR, A., DANIN, A. Spatial variations in vegetation as related to the soil moisture regime over an arid limestone hillside, northern Negev, Israel. **Ecology**, v. 47, p. 83-88, 1980. <https://doi.org/10.1007/BF00541779>.

YANG, Y.; GUNINA, A.; CHENG, H.; LIU, L.; WANG, B.; DOU, Y.; WANG, Y.; LIANG, C.; AN, S.; CHANG, S. X. Unlocking Mechanisms for Soil Organic Matter Accumulation: Carbon Use Efficiency and Microbial Necromass as the Keys. **Global Change Biology**, v. 31, n. 1, p. e70033, 2025. <https://doi.org/10.1111/gcb.70033>.

YAO, B.; ZENG, X.; PANG, L.; KONG, X.; TIAN, K.; JI, Y.; SUN, S.; TIAN, X. The photodegradation of lignin methoxyl C promotes fungal decomposition of lignin aromatic C measured with ¹³C-CPMAS NMR. **Journal of Fungi**, v. 8, n. 9, p. 900, 2022. <https://doi.org/10.3390/jof8090900>.

YATES, C. J.; ROBINSON, T.; WARDELL-JOHNSON, G. W.; KEPPEL, G.; HOPPER, S. D.; SCHUT, A. G. T.; BYRNE, M. High species diversity and turnover in granite inselberg floras highlight the need for a conservation strategy protecting many outcrops. **Ecology and Evolution**, v. 9, p. 7660-7675, 2019. <https://doi.org/10.1002/ece3.5318>.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988. <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>.

YU, W.; HUANG, W.; WEINTRAUB-LEFF, S. R.; HALL, S. J. Where and why do particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM) differ among diverse soils?. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 172, p. 108756, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108756>.

ZACHOS, F. E.; HABEL, J. C. (Eds.) **Biodiversity Hotspots: Distribution and Protection of Conservation Priority Areas**. Springer Berlin, Heidelberg, 2011. p. 546. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20992-5>.

ZHAO, Z.; SHEN, Y.; JIANG, R.; WANG, Q. Rock outcrops change infiltrability and water flow behavior in a karst soil. **Vadose Zone Journal**, v. 19, n. 1, e20002, p. 1-15, 2019. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20002>.

ZHENG, S.; LI, W.; LAN, Z.; REN, H.; WANG, K. Functional trait responses to grazing are mediated by soil moisture and plant functional group identity. **Scientific Reports**, v. 5, 18163, p. 1-12, 2015. <https://doi.org/10.1038/srep18163>.

ZHU, X.; SHEN, Y.; HE, B.; ZHAO, Z. Humus soil as a critical driver of flora conversion on karst rock outcrops. **Scientific reports**, v. 7, p. 12611, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13060-5>.

ZINCK, J. A. The Geomorphic Landscape: Classification of Geoforms. In: ZINCK, J. A.; METTERNICHT, G.; DEL VALLE, H. F.; ANGELINI, M. (EDS) **Geopedology: An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies**. Springer, Cham, 2023, p. 107-131. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20667-2_7.

APÉNDICE A – BIBLIOMETRIC INFORMATION FROM THE LITERATURE REVIEW.

Database	Authors	Title	Year	Source Title	DOI
<i>Included articles</i>					
Snowballing	Antheime, F.; Mato, M. W.; Maley, J.	Elevation and local refuges ensure persistence of mountain specific vegetation in the Nigerien Sahara	2008	Journal of Arid Environments	https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.07.003
Scopus	Barbacenas-Argüello, M. L.; Gutiérrez-Castorena, M. del C.; Terrazas, T.; López-Mata, L.	Rock-Soil Preferences of Three Cephalocereus (Cactaceae) Species of Tropical Dry Forests	2010	Soil Mineralogy	https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0310
Snowballing	Burke, A.	Determinants of inselberg floras in arid Nama Karoo landscapes	2002	Journal of Biogeography	https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2001.00623.x
Snowballing	Burke, A.	Properties of soil pockets on arid Nama Karoo inselbergs—the effect of geology and derived landforms	2002	Journal of Arid Environments	https://doi.org/10.1006/jare.2001.0907
Snowballing	Burke, A.	How special are Etendeka mesas? Flora and elevation gradients in an arid landscape in north-west Namibia	2003	Journal of Arid Environments	https://doi.org/10.1016/S0140-1963(02)00293-8
Scopus	Clark-Ioannou, S. M.; Wardell-Johnson, G. W.; Millet, J.	Multi-scale biogeographic controls over plant communities on granite outcrops in the Southwest Australian Floristic Region	2021	Austral Ecology	https://doi.org/10.1111/aec.13018
Snowballing	Ottaviani, G.; Marcantonio, M.; Mucina, L.	Soil depth shapes plant functional diversity in granite outcrops vegetation of Southwestern Australia	2016	Plant Ecology & Diversity	https://doi.org/10.1080/17550874.2016.1211192
Snowballing	Rafiee, F.; Ejtehadi, H.; Farzam, M.; Zare, H.; Bashirzadeh, M.	Changes in plant biodiversity facets of rocky outcrops and their surrounding rangelands across precipitation and soil gradients	2022	Scientific Reports	https://doi.org/10.1038/s41598-022-13123-2
Snowballing	Schut, A. G. T.; Wardell-Johnson, G. W.; Yates, C. J.; Keppel, G.; Baran, I.; Franklin, S. E.; Hopper, S. D.; Van Niel, K. P.; Mucina, L.; Byrne, M.	Rapid Characterisation of Vegetation Structure to Predict Refugia and Climate Change Impacts across a Global Biodiversity Hotspot	2014	PLOS ONE	https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082778
Snowballing	Yair, A.; Danin, A.	Spatial variations in vegetation as related to the soil moisture regime over an arid limestone hillside, northern Negev, Israel	1980	Oecologia	https://doi.org/10.1007/BF00541779
Snowballing	Yates, C. J.; Robinson, T.; Wardell-Johnson, G. W.; Keppel, G.; Hopper, S. D.; Schudt, A. G. T.; Byrne, M.	High species diversity and turnover in granite inselberg floras highlight the need for a conservation strategy protecting many outcrops	2019	Ecology and Evolution	https://doi.org/10.1002/ece3.5318

Continue

APÊNDICE B – LIST OF MAIN PLANT SPECIES IDENTIFIED IN THE SOIL PROFILE LOCATIONS.

Families	Common name	Scientific name	Habits	Phytogeographic domains	Endemism in Brazil	Origin	Soil profiles
Euphorbiaceae	Tapa-buraco	<i>Acalypha brasiliensis</i>	Shrub, Subshrub	AMF, CAA, CER, ATF	NO	Native	P8, P9, P12, P13 and P14
Apocynaceae	Alamanda-rosa	<i>Allamanda blanchetii</i>	Shrub	CAA, CER	YES	Native	P16, P17 and P19
Sapindaceae	Goiaba-brava	<i>Allophylus quercifolius</i>	Shrub, Tree	CAA, CER	YES	Native	P6, P8 and P9
Fabaceae	Cumaru-de-cheiro/ Umburana de cheiro	<i>Amburana cearensis</i>	Tree	CAA, CER, ATF, PAN	NO	Native	P1 and P18
Anacardiaceae	Cajueiro	<i>Anacardium occidentale</i>	Tree	AMF, CAA, CER, ATF, PAM, PAN	NO	Native	P6
Fabaceae	Angico	<i>Anadenanthera colubrina</i>	Shrub, Tree	CAA, CER, ATF	NO	Native	P1, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P16, P17, P18, P19, P25 and P27
Apocynaceae	Pereiro	<i>Aspidosperma pyrifolium</i>	Tree	CAA, CER	NO	Native	P1, P7, P8, P9, P12, P13, P14, P15, P17, P22, P23, P26, P29 and P31
Anacardiaceae	Aroeira	<i>Astronium urundeua</i>	Tree	CAA, CER, ATF, PAM, PAN	NO	Native	P1, P8, P9, P12, P13, P14, P16, P20 and P26
Fabaceae	Mororó/Pata de Vaca	<i>Bauhinia cheilantha</i>	Shrub, Tree	CAA, CER	NO	Native	P1, P6, P7, P8, P9, P12, P13, P14, P16, P19 and P26
Bixaceae	Urucum/Colorau	<i>Bixa orellana</i>	Shrub, Tree	AMF, CER, ATF	NO	Native	P16
Bromeliaceae	Macambira	<i>Bromelia laciniosa</i>	Herb	CAA	YES	Native	P1, P3, P5, P7, P8, P9, P12, P13, P14, P15, P16, P22, P26 and P27
Vochysiaceae	Vassourinha	<i>Callisthene microphylla</i>	Shrub, Tree	AMF, CAA, CER	YES	Native	P12, P13 and P14
Myrtaceae	Guabirola/ Gabirola	<i>CamPOManesia eugenioides</i>	Shrub, Tree	CAA, CER, ATF	YES	Native	P1, P6, P8, P9, P12, P13, P14 and P16
Solanaceae	Pimenta-do-mato	<i>Capsicum parvifolium</i>	Shrub	CAA, ATF	YES	Native	P8 and P9
Malvaceae	Barriguda	<i>Celba glaziovii</i>	Tree	CAA	YES	Native	P1, P7, P17 and P19
Fabaceae	Catingueira	<i>Cenostigma nordestinum</i>	Shrub, Tree	CAA	YES	Native	P1, P6, P8, P9, P10, P11, P14, P23, P25, P26, P27 and P31
Cactaceae	Mandacaru/ Cardeiro	<i>Cereus jamacaru</i>	Tree, Succulent	CAA, CER	YES	Native	P6, P7, P10, P11, P15, P22, P26 and P27
Fabaceae	Jurema Branca	<i>Chloroleucon dumosum</i>	Tree	CAA, CER, ATF	YES	Native	P1 and P23
Fabaceae	Angico-branco	<i>Chloroleucon tortum</i>	Tree	CER, ATF	YES	Native	P6, P12 and P13

Continue

Families	Common name	Scientific name	Habits	Phytogeographic domains	Endemism in Brazil	Origin	Soil profiles
Euphorbiaceae	Favela/ Favela-de-cachorro	<i>Cnidoscolus quercifolius</i>	Shrub, Tree	CAA	YES	Native	P16 and P19
Euphorbiaceae	Urtiga-de-raposa /Favela	<i>Cnidoscolus obtusifolius</i>	Shrub	CAA	YES	Native	P16
Euphorbiaceae	Urtiga	<i>Cnidoscolus urens</i>	Shrub, Herb, Subshrub	AMF, CAA, CER, ATF	NO	Native	P1, P6, P8, P9, P12, P13, P14 and P15
Bixaceae	Pacotê	<i>Cochlospermum vitifolium</i>	Shrub, Tree	AMF, CAA, CER, ATF	NO	Native	P1, P4 and P16
Capparaceae	Icó	<i>Colicodendron yco</i>	Shrub	CAA	YES	Native	P1, P6, P12 and P13
Combretaceae	Cipaúba	<i>Combretum glaucocarpum</i>	Shrub, Tree	AMF, CAA, CER, ATF	NO	Native	P1, P8 and P9
Burseraceae	Imburana/Amburana/ Umburana	<i>Commiphora leptophloeos</i>	Shrub, Tree	AMF, CAA, CER	NO	Native	P1, P4, P5, P8, P9, P12, P13, P14, P15, P16, P19, P26 and P27
Arecaceae	Carnaúba	<i>Copernicia prunifera</i>	Palm	CAA, CER	YES	Native	P1 and P24
Boraginaceae	Freijorge	<i>Cordia trichotoma</i>	Tree	CAA, CER, ATF, PAM	NO	Native	P6
Rubiaceae	Puruna Peba Pilosa	<i>Cordia rigida</i>	Shrub, Subshrub	CAA, CER	YES	Native	P1, P8, P9, P12, P13 and P14
Euphorbiaceae	Marmeleiro	<i>Craton blanchetianus</i>	Shrub, Tree	CAA	YES	Native	P1, P3, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16, P22, P23, P25, P27 and P31
Euphorbiaceae	Velame	<i>Craton heliotropiifolius</i>	Shrub, Subshrub	CAA, CER, ATF	NO	Native	P6, P8, P9, P10, P11, P12, P13 and P14
Euphorbiaceae	Marmeleiro branco	<i>Craton urticifolius</i>	Shrub, Subshrub	CAA, CER, ATF	NO	Native	P8, P9 and P16
Capparaceae	Feijão-bravo	<i>Cynophalla flexuosa</i>	Shrub	AMF, CAA, CER, ATF, PAN	NO	Native	P1, P3, P8, P9, P12, P13, P14 and P24
Euphorbiaceae		<i>Argythamnia desertorum</i>	Shrub	CAA	YES	Native	P1, P6, P8, P9, P12, P13 and P14
Fabaceae	Tamboril	<i>Enterolobium contortisiliquum</i>	Tree	CAA, CER, ATF, PAM, PAN	NO	Native	P4, P6, P8, P9, P12, P13 and P14
Fabaceae	Mulungu	<i>Erythrina velutina</i>	Tree	CAA, CER	NO	Native	P4, P5, P16, P17 and P18
Erythroxylaceae	Cumixá/Olitizinho	<i>Erythroxylum revolutum</i>	Shrub, Tree	CAA, ATF	YES	Native	P8, P9, P12, P13, P14 and P16

Continue

Families	Common name	Scientific name	Habits	Phytogeographic domains	Endemism in Brazil	Origin	Soil profiles
Erythroxylaceae		<i>Erythroxylum rimosum</i>	Shrub, Subshrub	CAA, CER, ATF	YES	Native	P16
Erythroxylaceae	Galinha-choca/ Mercúrio-do-campo	<i>Erythroxylum suberosum</i>	Shrub, Tree, Subshrub	AMF, CER	NO	Native	P1, P6, P8, P9, P10, P11, P12, P13 and P16
Erythroxylaceae	Catuaba	<i>Erythroxylum vacciniifolium</i>	Shrub	CAA	NO	Native	P8 and P9
Myrtaceae		<i>Eugenia brejoensis</i>	Shrub, Tree	CAA, ATF	YES	Native	P16
Myrtaceae		<i>Eugenia</i> sp 2*		CAA, CER, ATF		Native	P1 and P16
Myrtaceae		<i>Eugenia</i> sp3*		CAA, CER, ATF		Native	P1 and P16
Euphorbiaceae		<i>Euphorbia phosphorea</i>	Shrub	CAA	YES	Native	P3 and P19
Nyctaginaceae	Guapira	<i>Guapira</i> sp*	Shrub, Tree, Subshrub	AMF, CAA, CER, ATF, PAN	NO	Native	P1, P8 and P9
Rubiaceae	Angélica	<i>Guettarda angelica</i>	Shrub, Tree	CAA	YES	Native	P1, P8 and P9
Bignoniaceae	Ipê Roxo	<i>Handroanthus impetiginosus</i>	Tree	AMF, CAA, CER, ATF, PAN	NO	Native	P1, P2, P4, P6, P7, P8, P9, P16, P17, P18 and P19
Malvaceae	Mela-bode	<i>Herissantia tiubae</i>	Shrub, Herb, Subshrub	CAA, CER	YES	Native	P12, P13 and P14
Fabaceae	Jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i>	Tree	AMF, CAA, CER, ATF, PAN	NO	Native	P16 and P17
Fabaceae	Jatobá/Tamarindo	<i>Hymenaea rubriflora</i>	Shrub, Tree	ATF	YES	Native	P1, P6, P7, P8, P9, P12, P13, P16, P17 and P18
Fabaceae	Anil	<i>Indigofera suffruticosa</i>	Shrub, Subshrub	AMF, CAA, CER, ATF, PAM	NO	Native	P6
Fabaceae	Ingá	<i>Inga edulis</i>	Tree	AMF, CAA, CER, ATF	NO	Native	P1
Euphorbiaceae	Pinhão Bravo	<i>Jatropha mollissima</i>	Shrub, Tree	AMF, CAA, CER	NO	Native	P1, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P14, P15, P16, P22, P23, P24, P25, P26, P27 and P31
Euphorbiaceae	Pinhão rasteiro	<i>Jatropha ribifolia</i>	Shrub, Subshrub	CAA, CER, PAN, PAM	YES	Native	P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P21, P22, P25, P27 and P31
Verbenaceae	Camará	<i>Lantana camara</i>	Shrub	AMF, CAA, CER, ATF, PAM, PAN	NO	Naturalized	P4, P12, P13 and P14

Continuation

Families	Common name	Scientific name	Habits	Phytogeographic domains	Endemism in Brazil	Origin	Soil profiles
Fabaceae	Pau Ferro	<i>Libidibia leiostachya</i>	Tree	ATF, CAA	YES	Native	P1, P6, P12, P10, P11, P13, P14, P16 and P17
Verbenaceae	Alecrim Bravo	<i>Lippia grata</i>	Shrub	AMF, CAA, CER, ATF	NO	Native	P3, P6, P10, P11, P12, P13, P14 and P15
Fabaceae	Pau Mocó	<i>Luetzelburgia auriculata</i>	Tree	AMF, CAA, CER	YES	Native	P1, P12, P13 and P14
Euphorbiaceae	Maniçoba	<i>Manihot carthagenensis</i>	Shrub, Tree	AMF, CAA, CER	NO	Native	P4, P5, P8 and P9
Cactaceae	Coroa-de-frade	<i>Melocactus zehntneri</i>	Subshrub, Succulent	CAA, CER	YES	Native	P3, P5, P11, P15, P22, P23, P25, P26 and P27
Malvaceae	Guaxuma roxa	<i>Melochia pyramidata</i>	Herb, Subshrub	AMF, CAA, CER, ATF	NO	Native	P6
Fabaceae	Jurema Vermelha	<i>Mimosa ophthalmocentra</i>	Shrub, Tree	CAA	YES	Native	P1, P12, P13, P14, P16, P23 and P26
Fabaceae	Jurema	<i>Mimosa paraibana</i>	Shrub	CAA, ATF	YES	Native	P1, P8 and P9
Fabaceae	Jurema Preta	<i>Mimosa tenuiflora</i>	Shrub, Tree, Subshrub	CAA, CER	NO	Native	P6, P8, P9, P14 and P23
Celastraceae	Bom-nome	<i>Monteverdia rigida</i>	Shrub, Tree	CAA, CER	YES	Native	P1, P6, P8 and P9
Myrtaceae	Guamirim-ferro	<i>Myrcia neolucida</i>	Tree	AMF, CER, ATF	NO	Native	P1, P8 and P9
Myrtaceae	Araçazinho	<i>Myrcia tomentosa</i>	Shrub, Tree	AMF, CAA, CER, ATF	NO	Native	P1, P8, P9, P12, P13 and P14
Boraginaceae	Niguiba	<i>Myriopus rubicundus</i>	Shrub, Subshrub, Climber	CAA, CER, ATF	YES	Native	P12, P13 and P14
Fabaceae	Balsamo	<i>Myroxylon peruliferum</i>	Tree	CER, ATF	NO	Native	P1, P8, P9 and P12
Bromeliaceae	Caroá	<i>Neoglaziovia variegata</i>	Herb	CAA	YES	Native	P8, P9, P12, P13, P14, P16, P17 and P19
Cactaceae	Palma Forrageira/ Palma-de-espinho	<i>Opuntia dillenii</i>	Shrub	CAA, ATF	NO	Naturalized	P28 and P29
Fabaceae	Pau-roxo	<i>Peltogyne pauciflora</i>	Tree	CAA	YES	Native	P12, P13 and P14
Cactaceae	Facheiro	<i>Pilosocereus pachycladus</i>	Shrub, Tree, Succulent	CAA, CER	YES	Native	P1, P3, P6, P5, P8, P9, P12, P13, P14, P16, P17 and P19
Fabaceae	Jurema branca	<i>Piptadenia retusa</i>	Shrub, Tree	CAA	NO	Native	P13 and P14

Continue

Families	Common name	Scientific name	Habits	Phytogeographic domains	Endemism in Brazil	Origin	Soil profiles
Nyctagenaceae	Maria Faceira	<i>Pisonia ambigua</i>	Tree	ATF	NO	Native	P6 and P12
Myrtaceae	Jaboticaba	<i>Plinia grandifolia</i>	Tree	ATF	YES	Native	P1 and P18
Plumbaginaceae	Erva-do-diabo	<i>Plumbago scandens</i>	Shrub, Subshrub	AMF, CAA, ATF	NO	Native	P6
Sapotaceae	Aguaí-guaçu	<i>Pouteria gardneriana</i>	Shrub, Tree	CAA, CER, ATF	NO	Native	P6
Fabaceae	Algaroba	<i>Prosopis juliflora</i>	Tree	CAA, PAM	NO	Naturalized	P20, P23, P24 and P30
Malpighiaceae		<i>Ptilochaeta bahiensis</i>	Shrub	CAA, CER	YES	Native	P8 and P9
Amaranthaceae		<i>Quaternella ephedroides</i>	Subshrub	CAA, CER	YES	Native	P8 and P9
Rhamnaceae		<i>Rhamnidium molle</i>	Shrub, Tree	CAA	YES	Native	P1, P6, P8, P9, P12, P13 and P14
Rhamnaceae	Juazeiro	<i>Sarcophthalus joazeiro</i>	Tree	CAA, CER, PAN	NO	Native	P9, P12, P13, P14 and P23
Phyllanthaceae		<i>Savia sessiliflora</i>	Tree	CAA	NO	Native	P12, P13 and P14
Anacardiaceae	Baraúna	<i>Schinopsis brasiliensis</i>	Tree	CAA, CER	NO	Native	P1, P12, P13, P14, P16, P17 and P18
Euphorbiaceae	Purga-de-leite	<i>Sebastiania macrocarpa</i>	Shrub, Tree	CAA	YES	Native	P1
Fabaceae	Canáfitula	<i>Senna martiana</i>	Shrub	CAA	YES	Native	P4, P6, P12, P16, P17 and P19
Fabaceae	Fedegoso branco	<i>Senna obtusifolia</i>	Herb, Subshrub	AMF, CAA, CER, ATF, PAM, PAN	NO	Native	P6 and P16
Fabaceae	Besouro	<i>Senna splendida</i>	Shrub, Liana, Climber	CER, ATF, PAN	NO	Native	P6, P8 and P9
Malvaceae	Malva amarela	<i>Sida galheirensis</i>	Subshrub	CAA, CER, ATF	YES	Native	P3, P5, P6, P7, P10, P11, P14, P15, P17, P20, P21, P22, P23, P24, P25, P26, P27, P30 and P31
Malvaceae	Malva roxa	<i>Sidastrum paniculatum</i>	Subshrub	AMF, CAA, CER, ATF	NO	Native	P6
Sapotaceae	Quixabeira	<i>Sideroxylon obtusifolium</i>	Shrub, Tree	CAA, CER, ATF, PAN	NO	Native	P1, P12, P13, P14 and P23
Solanaceae		<i>Solanum rhytidandrum</i>	Shrub	AMF, CAA, CER	NO	Native	P6, P8 and P9
Arecaceae	Catole	<i>Syagrus cearensis</i>	Palm	CAA, ATF	YES	Native	P1, P12, P13, P16, P17, P18 and P19

Continue

Families	Common name	Scientific name	Habits	Phytogeographic domains	Endemism in Brazil	Origin	Soil profiles
Bignoniaceae	Craibeira	<i>Tabebuia aurea</i>	Tree	AMF, CAA, CER, ATF, PAN	NO	Native	P16 and P20
Bignoniaceae	Ipê Branco	<i>Tabebuia roseocalba</i>	Tree	CAA, CER, ATF	NO	Native	P8 and P9
Cactaceae	Palmatória sem espinho	<i>Tacinga inamoena</i>	Subshrub, Succulent	CAA	YES	Native	P1, P3, P5, P8, P9, P10, P11, P13, P14, P15, P16, P22, P24, P26 and P27
Cactaceae	Palmatória de espinho	<i>Tacinga palmadora</i>	Shrub, Subshrub, Succulent	CAA	YES	Native	P1, P3, P5, P7, P8, P9, P10, P11, P13, P14, P15, P17, P19, P22, P23, P26 and P27
Sapindaceae	Pitombeira	<i>Talisia esculenta</i>	Tree	AMF, CAA, CER, ATF	NO	Native	P1, P6, P12, P13, P16 and P20
Bignoniaceae		<i>Tanaecium dichotomum</i>	Liana, Climber	AMF, CAA, CER, PAN	NO	Native	P12 and P13
Rubiaceae	Guamarú	<i>Tocoyena formosa</i>	Tree, Subshrub	AMF, CAA, CER, ATF	NO	Native	P1, P6, P7, P8, P9, P12 and P13
Rubiaceae	Jenipapo-do-Mato	<i>Tocoyena sellowiana</i>	Shrub, Tree	AMF, CAA, ATF	YES	Native	P8 and P9
Turneraceae	Malva	<i>Turnera cearensis</i>	Shrub, Subshrub	CAA, ATF	YES	Native	P1, P12 and P13
Boraginaceae	Erva-baleeira	<i>Varronia curassavica</i>	Shrub	AMF, CAA, CER, ATF, PAM	NO	Native	P1, P6, P8, P9 and P16
Lamiaceae	Tarumã	<i>Vitex orinocensis</i>	Tree	AMF, ATF	NO	Native	P8, P9, P12, P13 and P16
Asteraceae	Arnica-do-mato	<i>Wedelia goyazensis</i>	Shrub	CAA, CER	YES	Native	P6
Olacaceae	Ameixa	<i>Ximenia americana</i>	Shrub, Tree	AMF, CAA, CER, ATF	NO	Native	P12, P13 and P14
Cactaceae	Xique-xique	<i>Xiquexique gounellei</i>	Shrub, Succulent	CAA, CER	YES	Native	P1, P3, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P13, P14, P15, P17, P19, P22, P23, P25, P26, P27, P30 and P31
Rutaceae	Mamica de Porca	<i>Zanthoxylum thoffolium</i>	Tree	AMF, CAA, CER, ATF, PAM, PAN	NO	Native	P1, P2, P6, P8, P9, P19, P12 and P13

Legend:

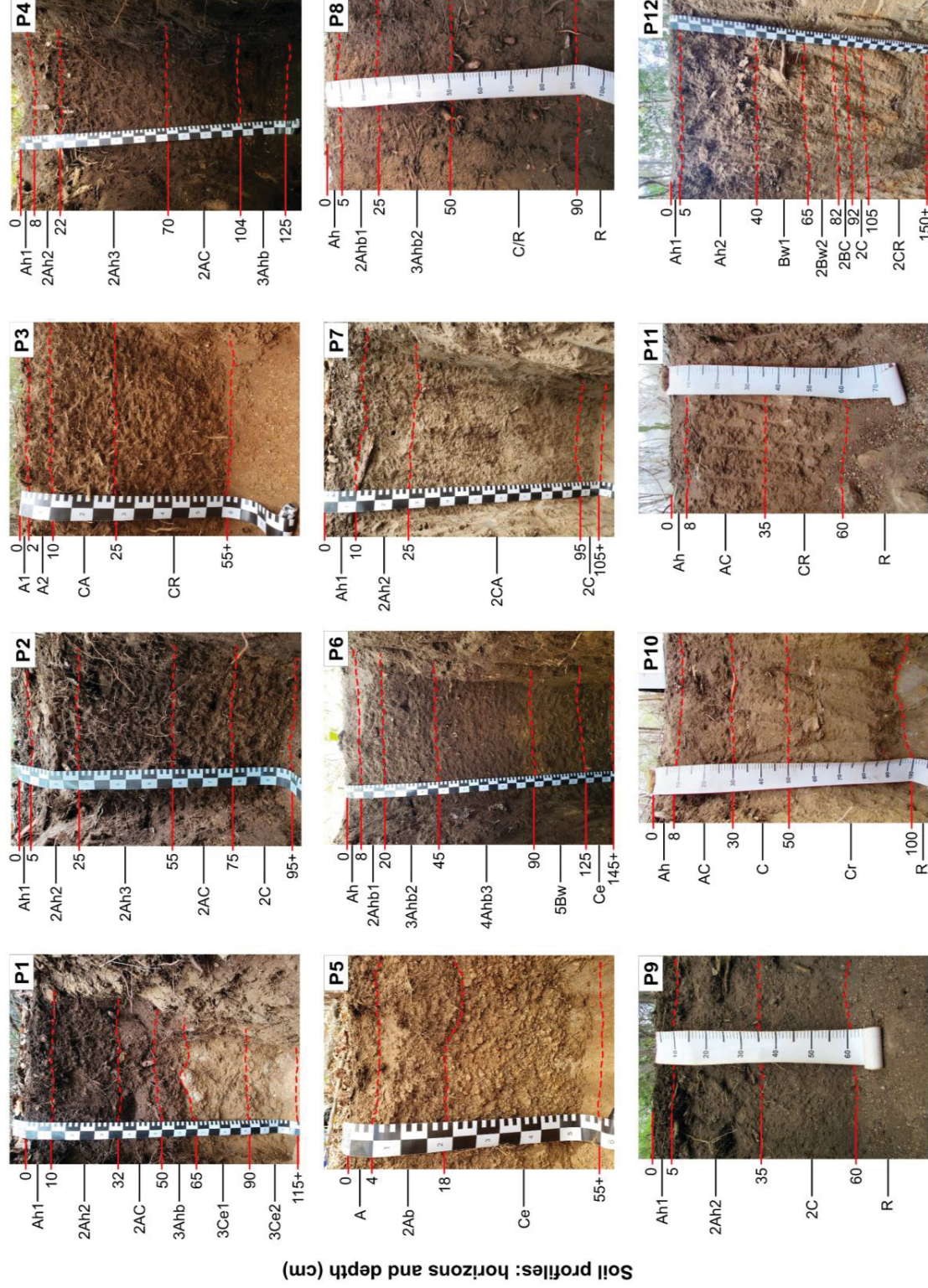
- * Only the genus
-  More water-demanding species that aren't native to the Caatinga
-  The Caatinga's most water-demanding native species
-  When dominant, these species are indicative of environments in a process of degradation/anthropization

Phytogeographic domains and their distribution in Brazil

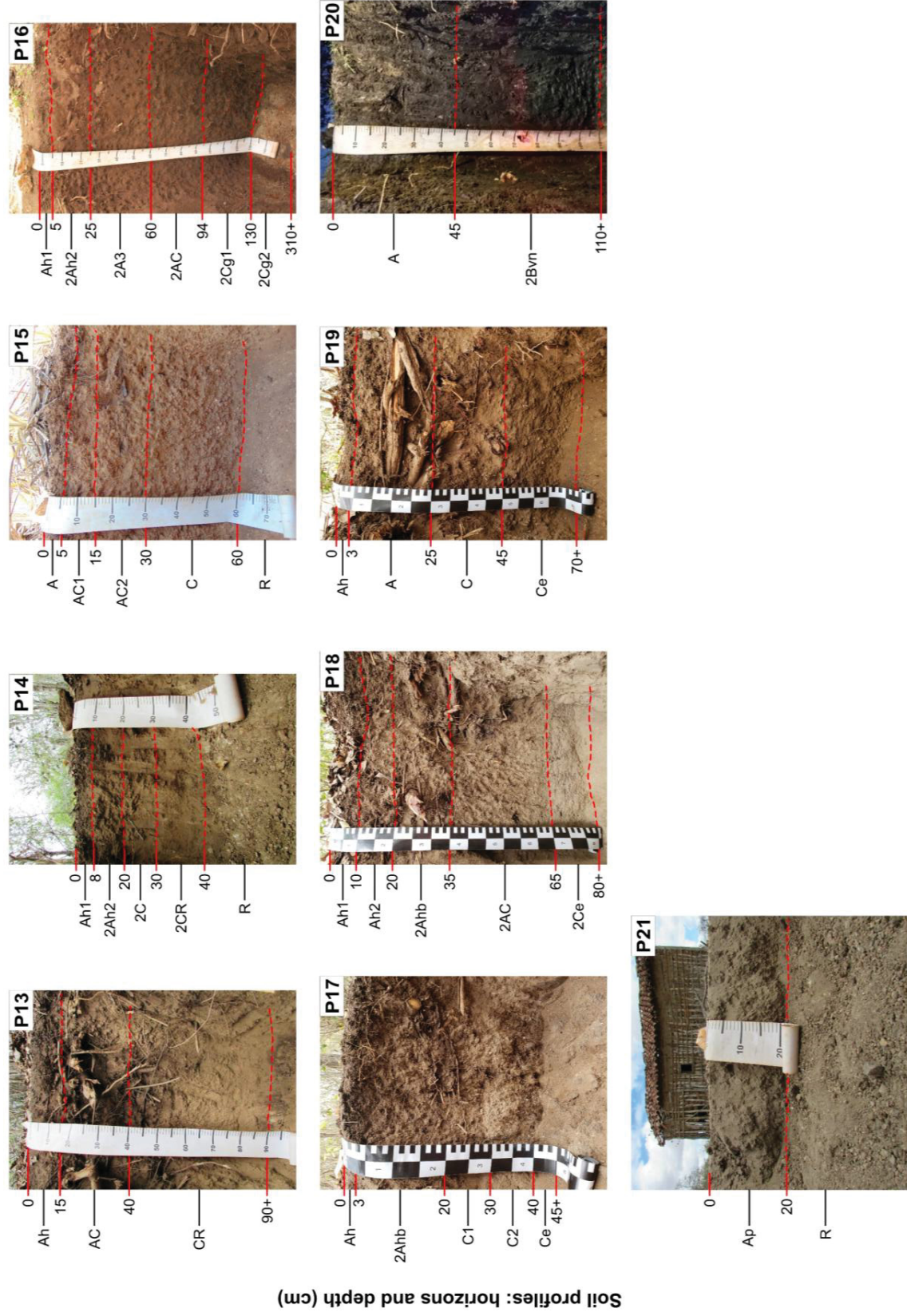
AMF	AMAZON FOREST (4.212.742 km² or 49,5%)
CAA	CAATINGA (862.818 km² or 10,1%)
CER	CERRADO (1.983.017 km² or 23,3%)
ATF	ATLANTIC FOREST (1.107.419 km² or 13,0%)
PAM	PAMPA (193.836 km² or 2,3%)
PAN	PANTANAL (150.988 km² or 1,8%)

SOURCE: Flora e Funga do Brasil (2025) and IBGE (2019). Elaboration by author (2025).

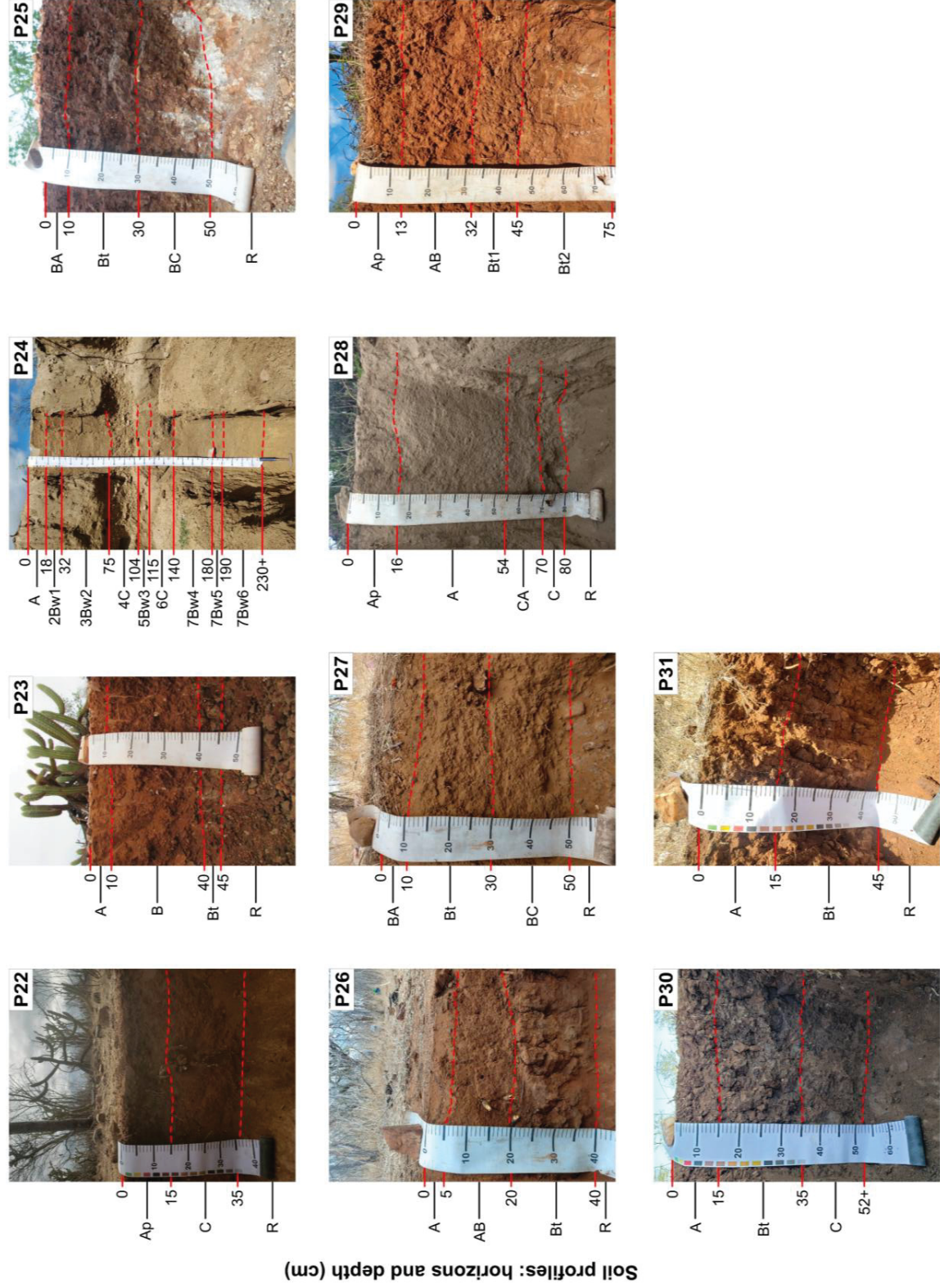
APÉNDICE C – SOIL PROFILES AND LANDSCAPES.



Elaboration by author (2025).

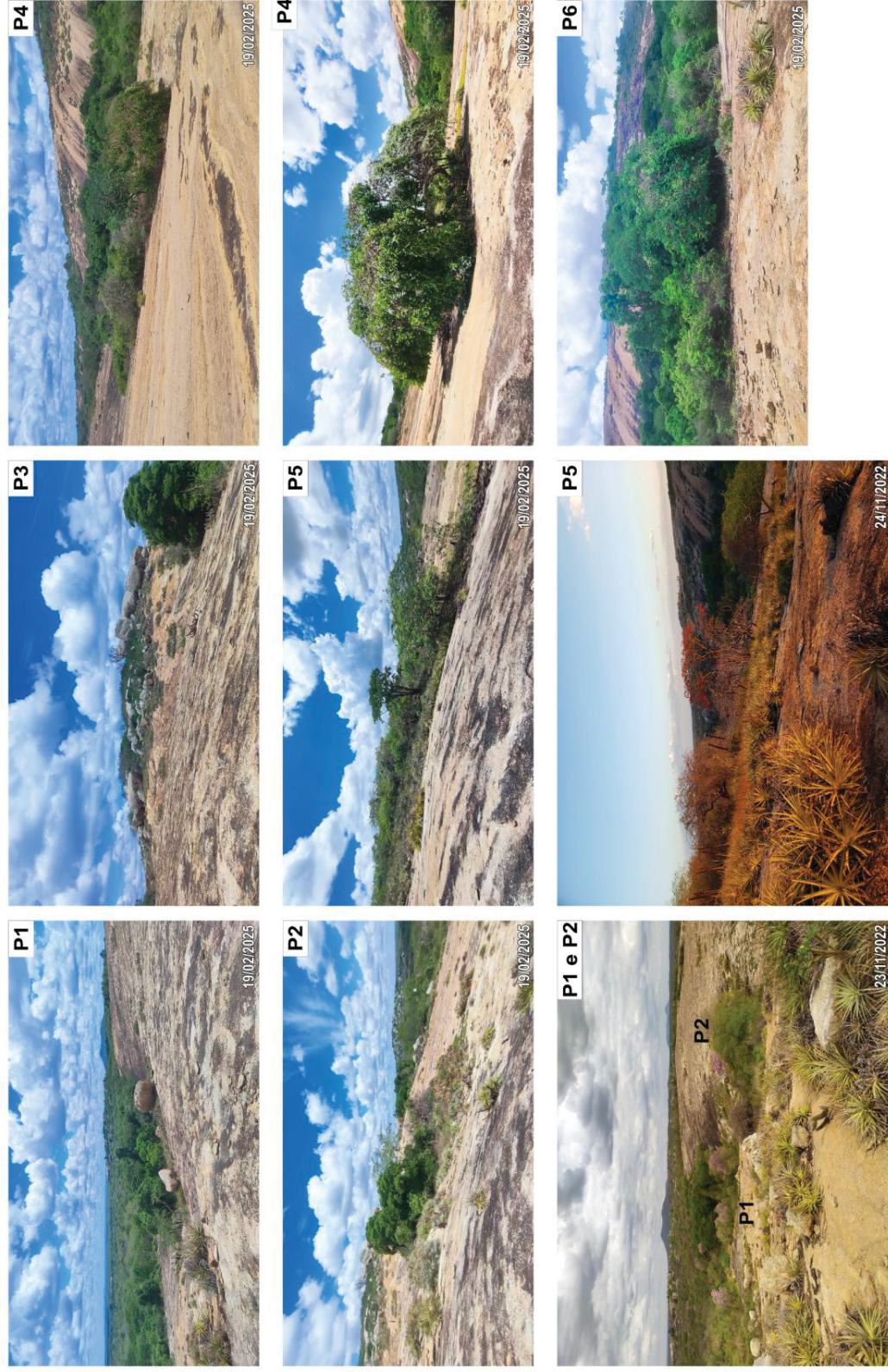


Elaboration by author (2025).

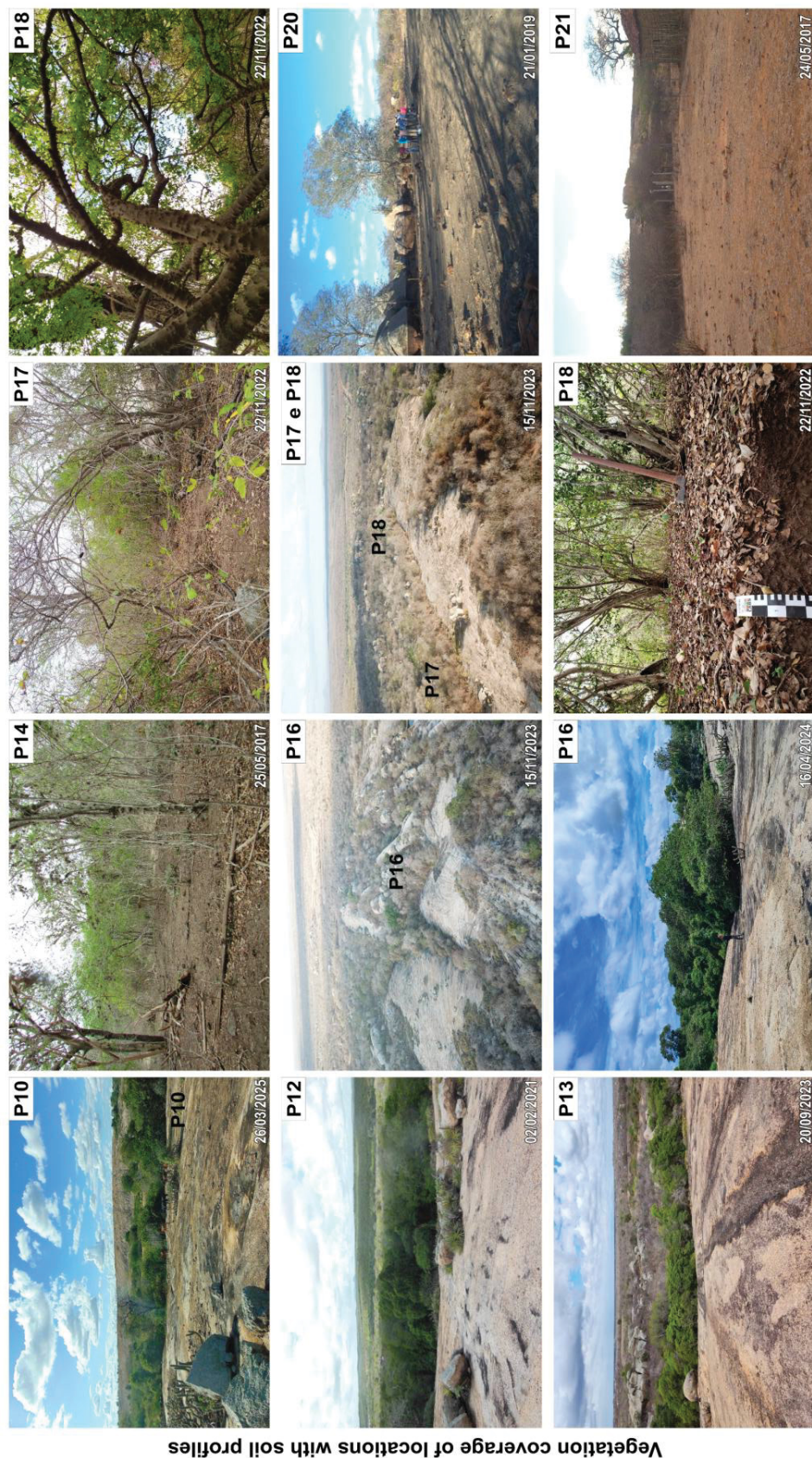


Elaboration by author (2025).

Vegetation coverage of locations with soil profiles



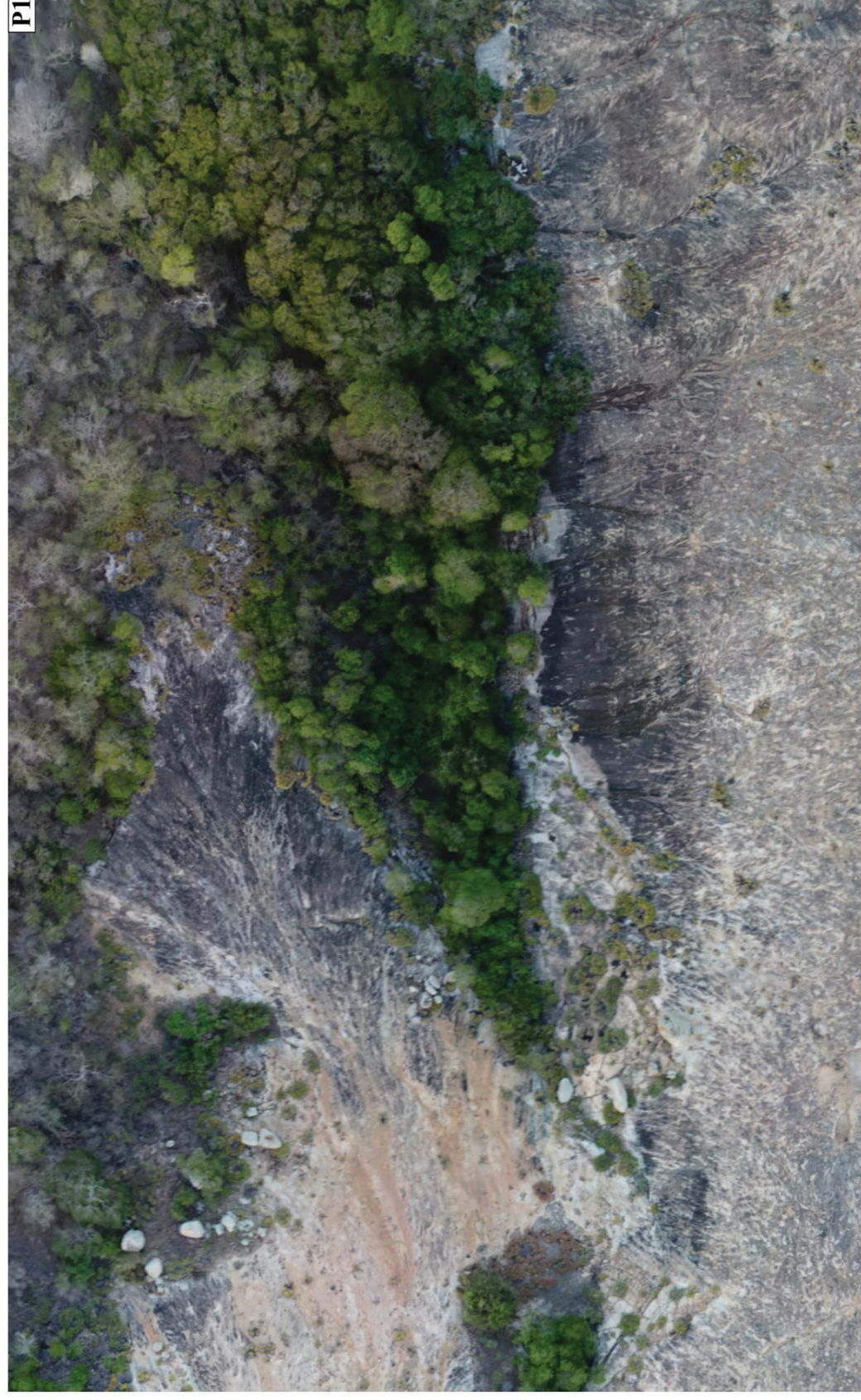
Elaboration by author (2025).



Vegetation coverage of locations with soil profiles

Elaboration by author (2025).

APÉNDICE D – VEGETATION COVER AND SOIL PROFILE IN GRANITIC INSELBERG FIELDS.



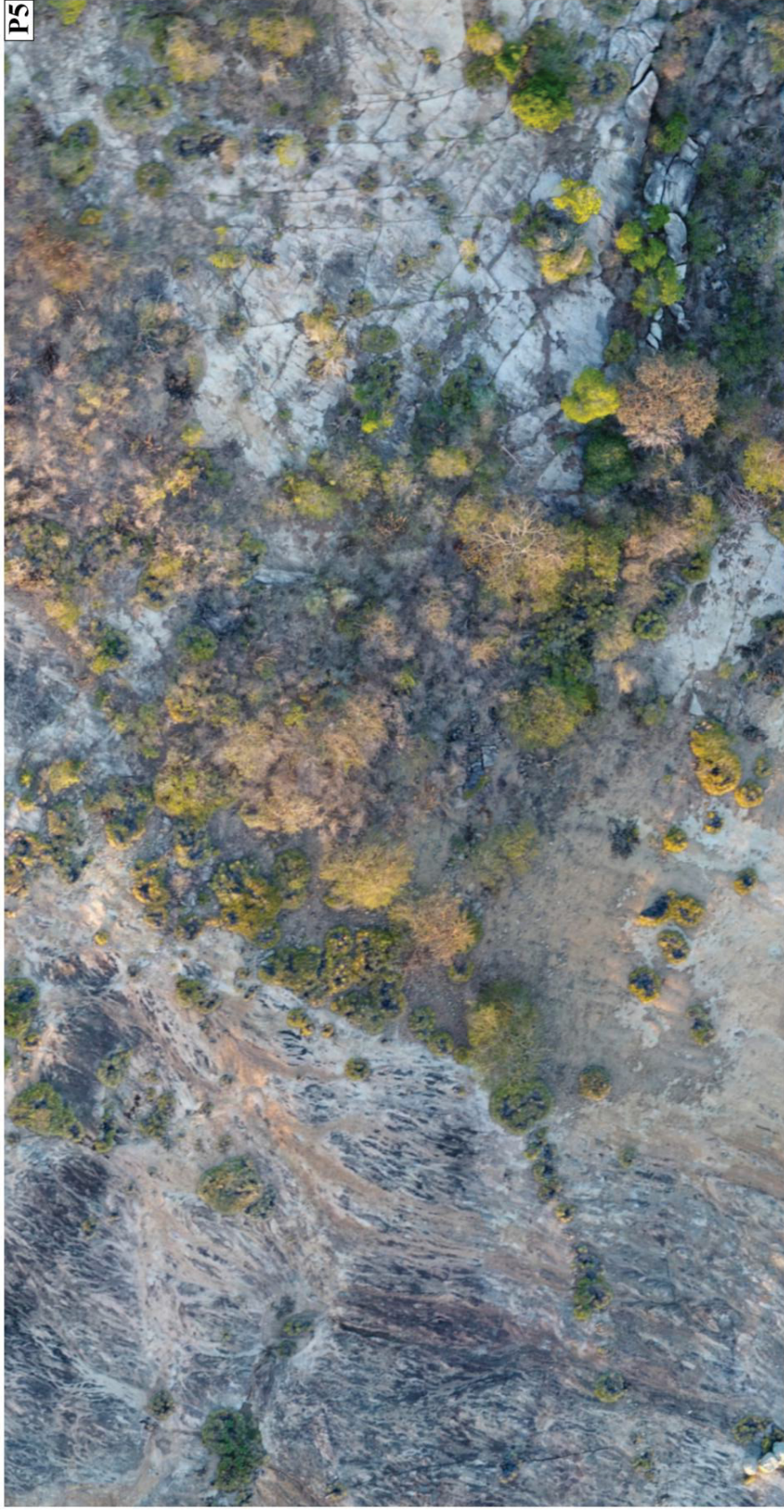




P4

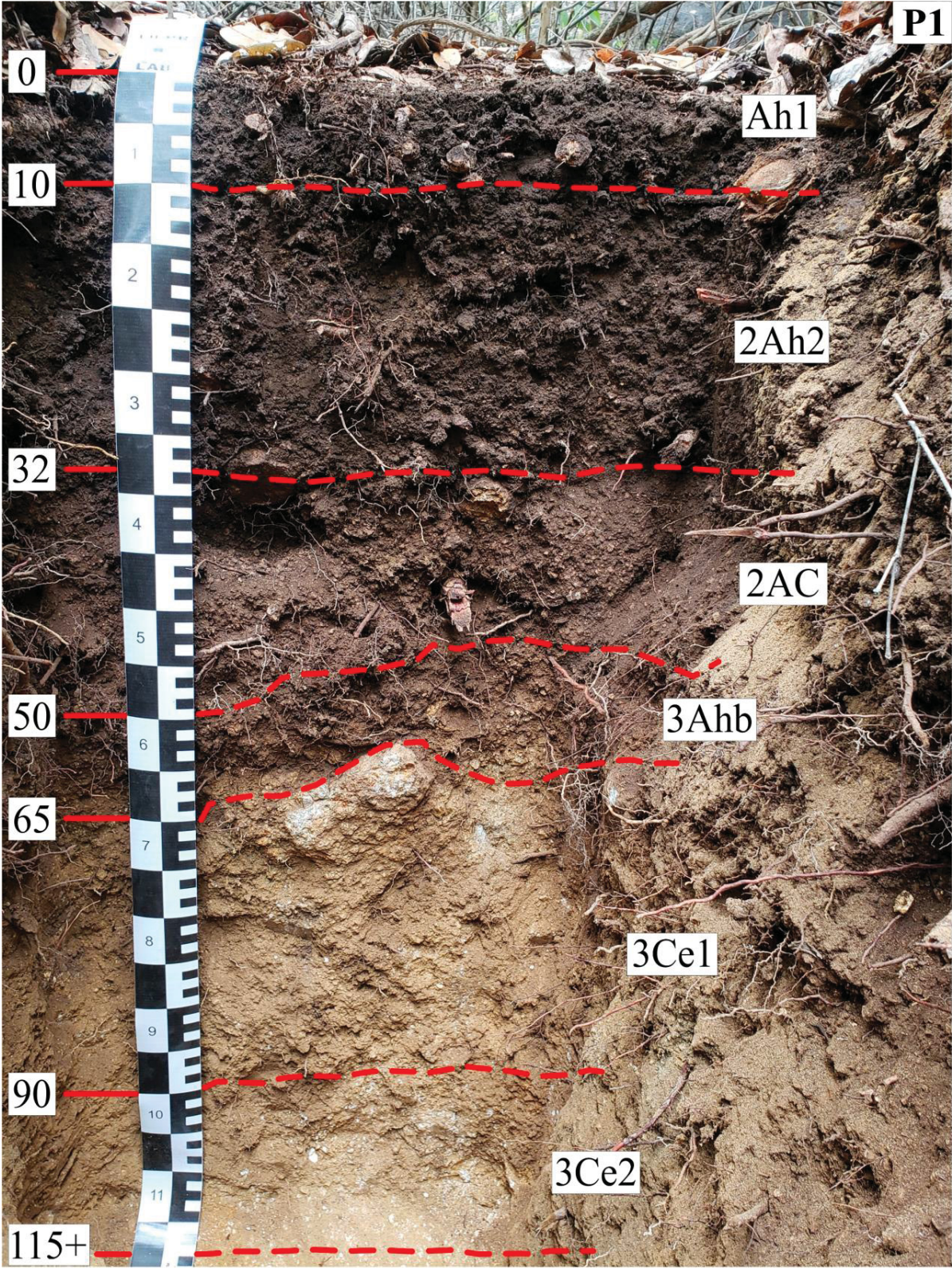


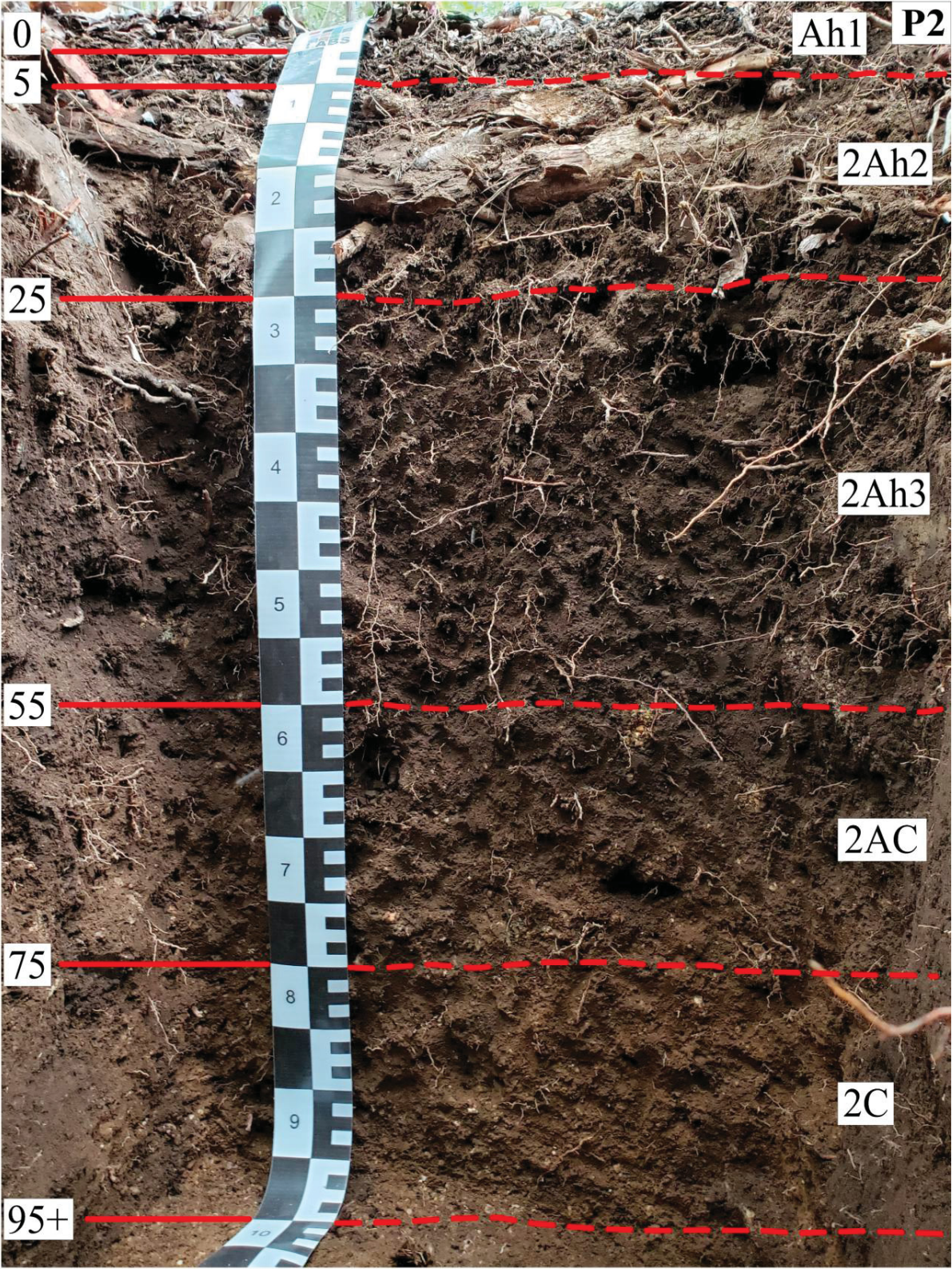
P5

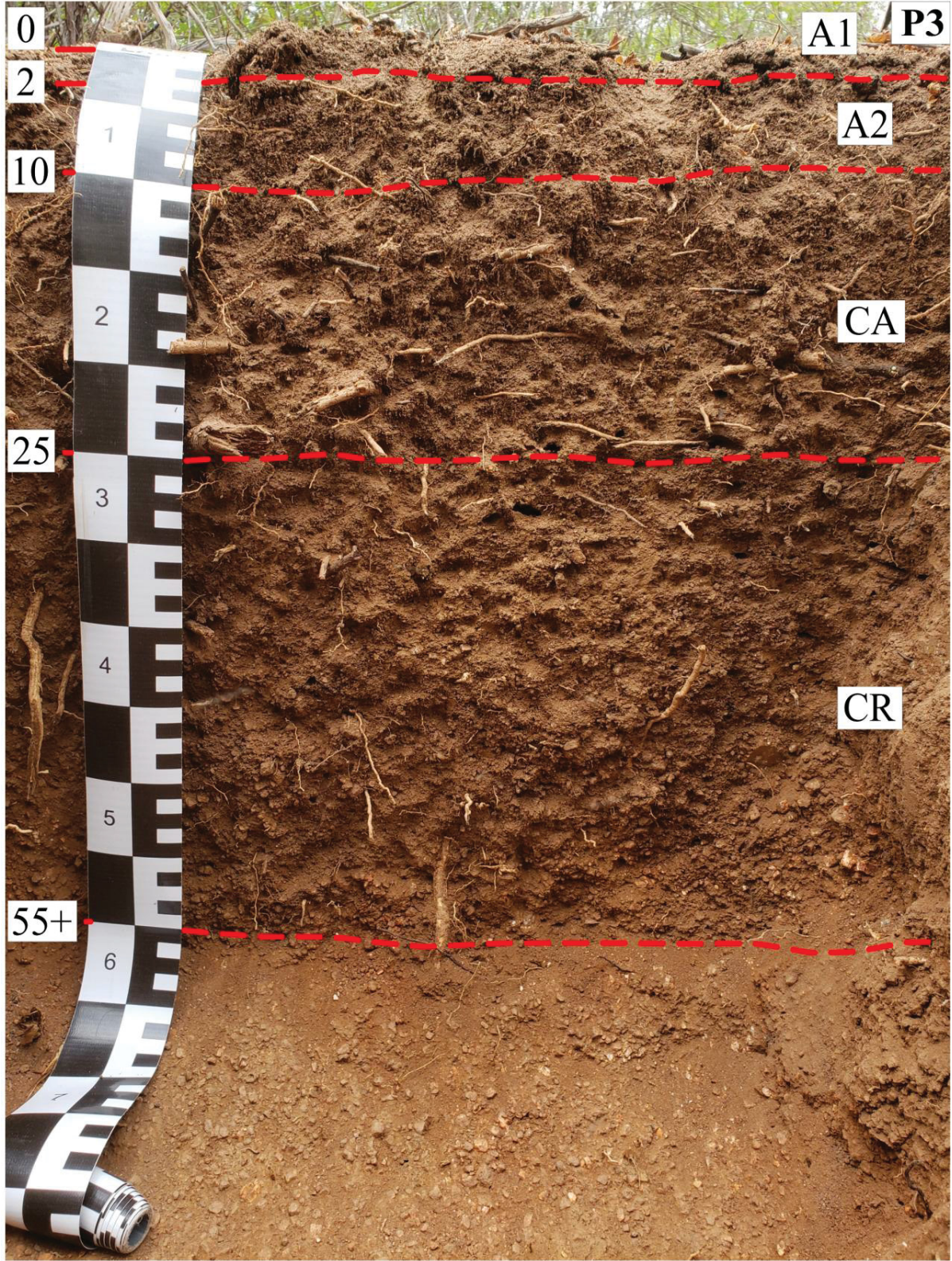




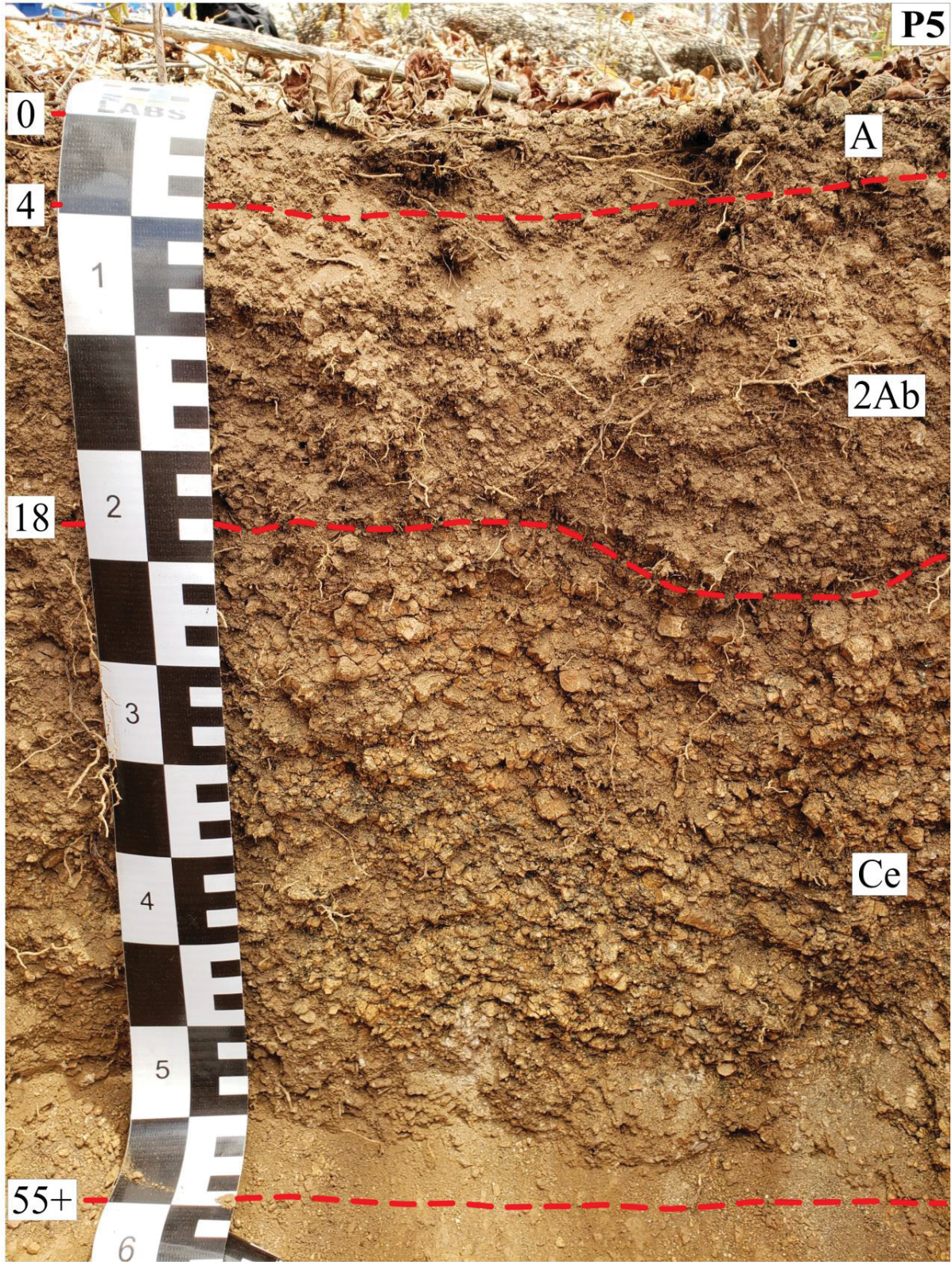
P6

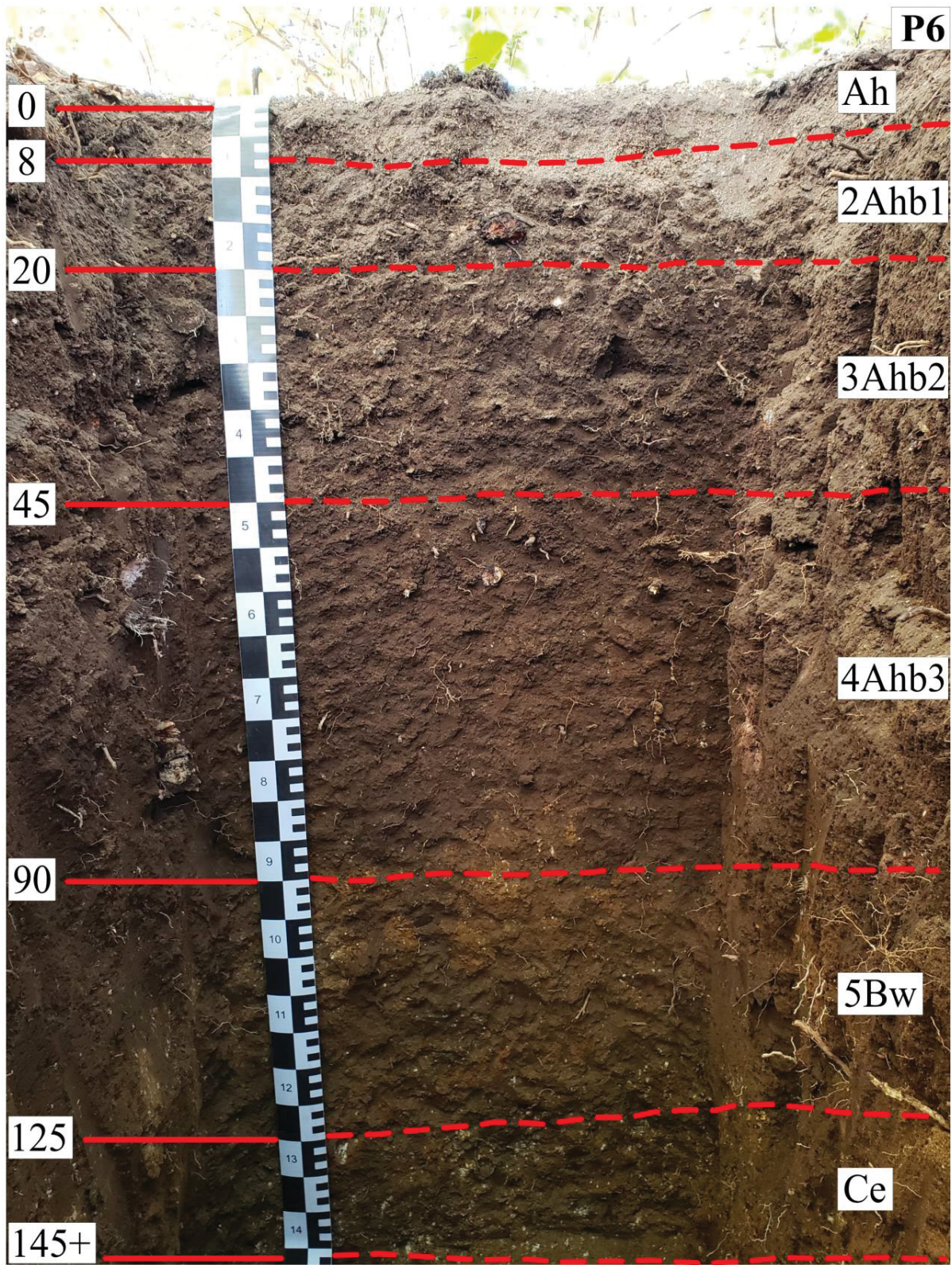












Elaboration by author (2025).

APÊNDICE E - LISTA DE COMPOSTOS ORGÂNICOS CONFORME SUA FÓRMULA MOLECULAR E SUA RESPECTIVA CADEIA CARBÔNICA NAS FRAÇÕES MOP E MOAM.

Compostos orgânicos	Fórmula molecular	Cadeia carbônica	Fração da MOS
Lignina (Lignin)			
2-Propenoic acid, 3-(3,4-dimethoxyphenyl)-, methyl ester	C ₁₂ H ₁₄ O ₄	Aromática	POM
2-Propenoic acid, 3-(4-methoxyphenyl)-, methyl ester, (E)-	C ₁₁ H ₁₂ O ₃	Aromática	POM - MOAM
Benzaldehyde, 3,4,5-trimethoxy-	C ₁₀ H ₁₂ O ₄	Aromática	MOP
Benzeneacetic acid, 3,4-dimethoxy-, methyl ester	C ₁₁ H ₁₄ O ₄	Aromática	MOP
Benzoic acid, 3,4,5-trimethoxy-, methyl ester	C ₁₁ H ₁₄ O ₅	Aromática	MOP - MOAM
Benzoic acid, 3,4-dimethoxy-, methyl ester	C ₁₀ H ₁₂ O ₄	Aromática	MOP - MOAM
Ethanone, 1-(3,4-dimethoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃	Aromática	MOP - MOAM
Phenol, 2,4-bis(1,1-dimethylethyl)-	C ₁₄ H ₂₂ O	Aromática	MOP - MOAM
Carboidrato (Carbohydrate)			
1,4-Dioxaspiro[2.4]heptan-5-one, 7,7-dimethyl-	C ₇ H ₁₀ O ₃	Alicíclica	MOAM
1-Hexadecanol	C ₁₆ H ₃₄ O	Alifática	MOP - MOAM
Quitina (Chitin)			
Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄	Alifática	MOP - MOAM
Cutina (Cutin)			
9-Octadecenoic acid, methyl ester	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	Alifática	MOP
9-Octadecenoic acid, methyl ester, (E)-	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	Alifática	MOP - MOAM
Hexadecanedioic acid, dimethyl ester	C ₁₈ H ₃₄ O ₄	Alifática	MOP - MOAM
Octadecanoic acid, 2-methylpropyl ester	C ₂₂ H ₄₄ O ₂	Alifática	MOP
Octadecanoic acid, butyl ester	C ₂₂ H ₄₄ O ₂	Alifática	MOP
Tetracosanoic acid, methyl ester	C ₂₅ H ₅₀ O ₂	Alifática	MOP - MOAM
Suberina (Suberin)			
13-Docosenoic acid, methyl ester, (Z)-	C ₂₃ H ₄₄ O ₂	Alifática	MOP - MOAM
1-Docosanol, methyl ether	C ₂₃ H ₄₈ O	Alifática	MOP - MOAM
1-Eicosanol	C ₂₀ H ₄₂ O	Alifática	MOP - MOAM
22-Tricosenoic acid	C ₂₃ H ₄₄ O ₂	Alifática	MOP - MOAM
Docosanedioic acid, dimethyl ester	C ₂₄ H ₄₆ O ₄	Alifática	MOP - MOAM
Docosanoic acid, methyl ester	C ₂₃ H ₄₆ O ₂	Alifática	MOP - MOAM
Eicosanoic acid, methyl ester	C ₂₁ H ₄₂ O ₂	Alifática	MOP - MOAM
Heneicosanoic acid, methyl ester	C ₂₂ H ₄₄ O ₂	Alifática	MOP
Heptacosanoic acid, methyl ester	C ₂₈ H ₅₆ O ₂	Alifática	MOP
Hexacosanoic acid, methyl ester	C ₂₇ H ₅₄ O ₂	Alifática	MOP - MOAM
Nonanedioic acid, dimethyl ester	C ₁₁ H ₂₀ O ₄	Alifática	MOP - MOAM
Octadecanedioic acid, dimethyl ester	C ₂₀ H ₃₈ O ₄	Alifática	MOP - MOAM
Oleic Acid	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	Alifática	MOP - MOAM
Triacontanedioic acid, dimethyl ester	C ₁₅ H ₂₈ O ₄	Alifática	MOP - MOAM
Triacotanoic acid, methyl ester	C ₃₁ H ₆₂ O ₂	Alifática	MOP - MOAM

Continue

Continuation			
Compostos orgânicos	Fórmula molecular	Cadeia carbônica	Fração da MOS
Ácido graxo <C₂₀ (Fatty acid <C₂₀)			
10,13-Octadecadienoic acid, methyl ester	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	Alifática	MOAM
10-Nonadecenoic acid, methyl ester	C ₂₀ H ₃₈ O ₂	Alifática	MOAM
11-Octadecenoic acid, methyl ester	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	Alifática	MOP - MOAM
14-Pentadecynoic acid, methyl ester	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	Alifática	MOP
17-Octadecenoic acid, methyl ester	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	Alifática	MOAM
17-Octadecynoic acid, methyl ester	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	Alifática	MOP
6-Octadecenoic acid, (Z)-	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	Alifática	MOP
7,10-Hexadecadienoic acid, methyl ester	C ₁₇ H ₃₀ O ₂	Alifática	MOP
7-Hexadecenoic acid, methyl ester, (Z)-	C ₁₇ H ₃₂ O ₂	Alifática	MOP
9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-, methyl ester	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	Alifática	MOP - MOAM
9,12-Octadecadienoic acid, methyl ester	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	Alifática	MOAM
9,12-Octadecadienoic acid, methyl ester, (E,E)-	C ₁₉ H ₃₄ O ₃	Alifática	MOP - MOAM
9-Octadecenoic acid	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	Alifática	MOP
9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl ester	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	Alifática	MOP
cis-10-Heptadecenoic acid	C ₁₇ H ₃₂ O ₂	Alifática	MOP
cis-11-Eicosenoic acid	C ₂₀ H ₃₈ O ₂	Alifática	MOAM
cis-Vaccenic acid	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	Alifática	MOP
Cyclopentanetridecanoic acid, methyl ester	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	Alifática	MOP
Hexadecadienoic acid, methyl ester	C ₁₇ H ₃₀ O ₂	Alifática	MOAM
Hexadecanoic acid, butyl ester	C ₂₀ H ₄₀ O ₂	Alifática	MOP
Hexadecanoic acid, methyl ester	C ₁₇ H ₃₄ O ₂	Alifática	MOP - MOAM
Methyl 18-methylnonadecanoate	C ₂₁ H ₄₂ O ₂	Alifática	MOAM
n-Hexadecanoic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	Alifática	MOP - MOAM
Octadecanoic acid	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	Alifática	MOP - MOAM
Pentanoic acid, 2,2,4-trimethyl-3-carboxyisopropyl, isobutyl ester	C ₁₆ H ₃₀ O ₄	Alifática	MOP
Tetradecanoic acid	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	Alifática	MOP
Alcanol/álcoois de cadeia longa (Alkanols long-chain)			
1,30-Triacontanediol	C ₃₀ H ₆₂ O ₂	Alifática	MOP - MOAM
1-Docosanol	C ₂₂ H ₄₆ O	Alifática	MOP - MOAM
1-Heneicosanol	C ₂₁ H ₄₄ O	Alifática	MOP - MOAM
1-Hentetracontanol	C ₄₁ H ₈₄ O	Alifática	MOP
1-Heptacosanol	C ₂₇ H ₅₆ O	Alifática	MOP - MOAM
1-Heptadecanol	C ₂₇ H ₅₆ O	Alifática	MOAM
1-Triacontanol	C ₃₀ H ₆₂ O	Alifática	MOP
n-Tetracosanol-1	C ₂₄ H ₅₀ O	Alifática	MOAM
Octacosanol	C ₂₈ H ₅₈ O	Alifática	MOP - MOAM
Alcanol/álcoois de cadeia média C₁₈ e C₂₀ (Alkanol C₁₈ e C₂₀)			
1-Dodecanol, 2-hexyl-	C ₁₈ H ₃₈ O	Alifática	MOP
1-Dodecanol, 2-octyl-	C ₂₀ H ₄₂ O	Alifática	MOP

Continue

Continuation			
Compostos orgânicos	Fórmula molecular	Cadeia carbônica	Fração da MOS
1-Octadecanol	C ₁₈ H ₃₈ O	Alifática	MOP
Ethanol, 2-(octadecyloxy)-	C ₂₀ H ₄₂ O ₂	Alifática	MOAM
Ethanol, 2-(tetradecyloxy)-	C ₂₀ H ₄₂ O ₂	Alifática	MOP - MOAM
Alcanol/álcoois de cadeia curta (Alkanols short-chain)			
1-Decanol, 2-hexyl-	C ₁₆ H ₃₄ O	Alifática	MOP
1-Heptadecanol	C ₁₇ H ₃₆ O	Alifática	MOP - MOAM
1-Nonadecanol	C ₁₉ H ₄₀ O	Alifática	MOP - MOAM
4-Tetradecanol	C ₁₄ H ₃₀ O	Alifática	MOP - MOAM
6,9-Octadecadienoic acid, methyl ester	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	Alifática	MOAM
Cyclobutanol, 1-butyl-	C ₈ H ₁₆ O	Alicíclica	MOAM
Oleyl alcohol, methyl ether	C ₁₉ H ₃₈ O	Alifática	MOP - MOAM
Alcanos C₇ - C₁₄ (Alkanes C₇ - C₁₄)			
Decane, 2,2,5-trimethyl-	C ₁₃ H ₂₈	Alifática	MOP - MOAM
Decane, 2,2,6-trimethyl-	C ₁₃ H ₂₈	Alifática	MOAM
Decane, 2,2,7-trimethyl-	C ₁₃ H ₂₈	Alifática	MOP - MOAM
Decane, 2,2,8-trimethyl-	C ₁₃ H ₂₈	Alifática	MOP - MOAM
Decane, 2,3,4-trimethyl-	C ₁₃ H ₂₈	Alifática	MOP - MOAM
Decane, 2,3,8-trimethyl-	C ₁₃ H ₂₈	Alifática	MOP
Dodecane, 2-methyl-	C ₁₃ H ₂₈	Alifática	MOP
Dodecane, 4,6-dimethyl-	C ₁₄ H ₃₀	Alifática	MOP
Nonane, 2,2,3-trimethyl-	C ₁₂ H ₂₆	Alifática	MOP - MOAM
Nonane, 2-methyl-5-propyl-	C ₁₃ H ₂₈	Alifática	MOP
Nonane, 5-(2-methylpropyl)-	C ₁₃ H ₂₈	Alifática	MOP - MOAM
Tetradecane	C ₁₄ H ₃₀	Alifática	MOP - MOAM
Tridecane	C ₁₃ H ₂₈	Alifática	MOAM
Undecane, 2,2-dimethyl-	C ₁₃ H ₂₈	Alifática	MOP - MOAM
Alcanos C₁₅ - C₂₆ (Alkanes C₁₅ - C₂₆)			
10-Heneicosene (c,t)	C ₂₁ H ₄₂	Alifática	MOP
1-Cyclopentyleicosane	C ₂₅ H ₅₀	Alicíclica	MOP
2,2-Dimethyleicosane	C ₂₂ H ₄₆	Alicíclica	MOP - MOAM
2,2-Dimethyloctadecane	C ₂₀ H ₄₂	Alicíclica	MOP - MOAM
2-methyltetracosane	C ₂₅ H ₅₂	Alifática	MOP - MOAM
5,5-Diethylheptadecane	C ₂₁ H ₄₄	Alifática	MOP
9-methylheptadecane	C ₁₈ H ₃₈	Alifática	MOP
Cyclopentane, heneicosyl-	C ₂₆ H ₅₂	Alifática	MOP
Cyclopentane, undecyl-	C ₁₆ H ₃₂	Alifática	MOP
Docosane	C ₂₂ H ₄₆	Alifática	MOP - MOAM
Dodecane, 2,2,11,11-tetramethyl-	C ₁₆ H ₃₄	Alifática	MOP
Eicosane	C ₂₀ H ₄₂	Alifática	MOP - MOAM
Heneicosane	C ₂₁ H ₄₄	Alifática	MOP - MOAM
Heptadecane	C ₁₇ H ₃₆	Alifática	MOP - MOAM

Continue

Continuation			
Compostos orgânicos	Fórmula molecular	Cadeia carbônica	Fração da MOS
Heptadecane, 2-methyl-	C ₁₈ H ₃₈	Alifática	MOP - MOAM
Hexacosane	C ₂₆ H ₅₄	Alifática	MOP - MOAM
Hexadecane, 2,6,10,14-tetramethyl-	C ₂₀ H ₄₂	Alifática	MOP - MOAM
Nonadecane	C ₁₉ H ₄₀	Alifática	MOP - MOAM
Octadecane	C ₁₈ H ₃₈	Alifática	MOP - MOAM
Pentacosane	C ₂₅ H ₅₂	Alifática	MOP - MOAM
Pentadecane	C ₁₅ H ₃₂	Alifática	MOP - MOAM
Pentadecane, 2,6,10,14-tetramethyl-	C ₁₉ H ₄₀	Alifática	MOP
Pentadecane, 3-methyl-	C ₁₆ H ₃₄	Alifática	MOP
Pentadecane, 8-hexyl-	C ₂₁ H ₄₄	Alifática	MOP
Tetracosane	C ₂₄ H ₅₀	Alifática	MOP - MOAM
Tetradecane, 2,2-dimethyl-	C ₁₆ H ₃₄	Alifática	MOP - MOAM
Tetradecane, 4-methyl-	C ₁₅ H ₃₂	Alifática	MOP - MOAM
Tricosane	C ₂₃ H ₄₈	Alifática	MOP - MOAM
Alcanos ímpares C₂₇ - C₃₃ (Alkanes odd C₂₇ - C₃₃)			
2-methylhexacosane	C ₂₇ H ₅₆	Alifática	MOP - MOAM
2-methyloctacosane	C ₂₉ H ₆₀	Alifática	MOP - MOAM
Hentriacontane	C ₃₁ H ₆₄	Alifática	MOP
Heptacosane	C ₂₇ H ₅₆	Alifática	MOP
Nonacosane	C ₂₉ H ₆₀	Alifática	MOP - MOAM
Octacosane	C ₂₈ H ₅₈	Alifática	MOP - MOAM
Tritriacontane	C ₃₃ H ₆₈	Alifática	MOP - MOAM
Outros alcanos (Other alkanes)			
Dotriacontane	C ₃₂ H ₆₆	Alifática	MOP
Hexatriacontane	C ₃₆ H ₇₄	Alifática	MOP - MOAM
Pentatriacontane	C ₃₅ H ₇₂	Alifática	MOP - MOAM
Tetracontane	C ₄₀ H ₈₂	Alifática	MOAM
Tetrapentacontane	C ₅₄ H ₁₁₀	Alifática	MOP - MOAM
Tetratetracontane	C ₄₄ H ₉₀	Alifática	MOP - MOAM
Tetratriacontane	C ₃₄ H ₇₀	Alifática	MOP - MOAM
Tritetracontane	C ₄₃ H ₈₈	Alifática	MOP
Alcenos (Alkenes)			
1-Heptadecene	C ₁₇ H ₃₄	Alifática	MOP
1-Nonadecene	C ₁₉ H ₃₈	Alifática	MOP - MOAM
1-Octadecene	C ₁₈ H ₃₆	Alifática	MOAM
1-Pentadecene	C ₁₅ H ₃₀	Alifática	MOP
Z-5-Nonadecene	C ₁₉ H ₃₈	Alifática	MOAM
MAM			
Methyl stearate	C ₁₉ H ₃₈ O ₂	Alifática	MOP - MOAM
Outros lípidios (Other lipids)			
(E)-13-Docosenoic acid	C ₂₂ H ₄₂ O ₂	Alifática	MOAM

Continue

Continuation

Compostos orgânicos	Fórmula molecular	Cadeia carbônica	Fração da MOS
11,14-Eicosadienoic acid, methyl ester	C ₂₁ H ₃₈ O ₂	Alifática	MOP - MOAM
13-Tetradecen-1-ol acetate	C ₁₆ H ₃₀ O ₂	Alifática	MOAM
1-Octadecanol, methyl ether	C ₁₉ H ₄₀ O	Alifática	MOAM
2,3,7-Trimethyloctanal	C ₁₁ H ₂₂ O	Alifática	MOP
2-Tridecenal	C ₁₃ H ₂₄ O	Alifática	MOAM
2-Tridecenal, (E)-	C ₁₃ H ₂₄ O	Alifática	MOAM
D-Friedoolean-14-en-3-one	C ₃₀ H ₄₈ O	Alifática	MOP - MOAM
Dodecanal	C ₁₂ H ₂₄ O	Alifática	MOAM
Eicosanebioic acid, dimethyl ester	C ₂₂ H ₄₂ O ₄	Alifática	MOAM
Hexadecanal	C ₁₆ H ₃₂ O	Alifática	MOAM
Octacosanoic acid, methyl ester	C ₂₉ H ₅₈ O ₂	Alifática	MOP - MOAM
Stigmast-4-en-3-one	C ₂₉ H ₄₈ O	Aromática	MOP
Stigmasta-5,22-diene, 3-methoxy-, (3.β.,22E)-	C ₃₀ H ₅₀ O	Aromática	MOP
Tricosanoic acid, 2-methoxy-, methyl ester	C ₂₅ H ₅₀ O ₃	Alifática	MOP
Tricosanoic acid, methyl ester	C ₂₄ H ₄₈ O ₂	Alifática	MOP - MOAM
Proteínas (Proteins)			
1H-Isoindole-1,3(2H)-dione, 2-methyl-	C ₉ H ₇ NO ₂	Aromática	MOAM
1H-Purin-6-amine, [(2-fluorophenyl)methyl]-	C ₁₂ H ₁₀ FN ₅	Aromática	MOP - MOAM
Adenine, N,N,N'-trimethyl	C ₅ H ₁₄ N ₂	Alifática	MOAM
Compostos nitrogenados (Nitrogenated compounds)			
1,3,5-Triazine-2,4,6(1H,3H,5H)-trione, 1,3,5-trimethyl-	C ₆ H ₉ N ₃ O ₃	Aromática	MOAM
1,4-Benzenediamine, N-(1-methylethyl)-N'-phenyl-	C ₁₅ H ₁₈ N ₂	Aromática	MOP - MOAM
13-Docosenamide, (Z)-	C ₂₂ H ₄₃ NO	Alifática	MOP - MOAM
1-Dodecanamine, N,N-dimethyl-	C ₁₄ H ₃₁ N	Alicíclica	MOP - MOAM
1-Methyldecylamine	C ₁₁ H ₂₅ N	Alifática	MOAM
1-Tetradecanamine, N,N-dimethyl-	C ₁₆ H ₃₅ N	Alifática	MOAM
1-Undecanamine, N,N-dimethyl-	C ₁₃ H ₂₉ N	Alifática	MOAM
2-Hexanamine, 4-methyl-	C ₇ H ₁₇ N	Alifática	MOAM
2-Pentanamine, 2,4,4-trimethyl-	C ₈ H ₁₉ N	Alifática	MOP - MOAM
2-Pyrrolidone-5-carboxylic acid, N-methyl, methyl ester	C ₇ H ₁₁ NO ₃	Alicíclica	MOP - MOAM
5,10-Diethoxy-2,3,7,8-tetrahydro-1H,6H-dipyrrolo[1,2-a:1',2'-d]pyrazine	C ₁₄ H ₂₂ N ₂ O ₂	Alicíclica	MOP
9-Octadecenamide, (Z)-	C ₁₈ H ₃₅ NO	Alifática	MOP - MOAM
Caffeine	C ₈ H ₁₀ N ₄ O ₂	Aromática	MOAM
Dibenzylamine	C ₁₄ H ₁₅ N	Aromática	MOP - MOAM
Dimethyl palmitamine	C ₁₈ H ₃₉ N	Alifática	MOAM
DL-Proline, 5-oxo-, methyl ester	C ₆ H ₉ NO ₃	Alifática	MOAM
Dodecanamide	C ₁₂ H ₂₅ NO	Alifática	MOP - MOAM
Hexadecanamide	C ₁₆ H ₃₃ NO	Alifática	MOP - MOAM
L-Proline, 1-methyl-5-oxo-, methyl ester	C ₇ H ₁₁ NO ₃	Alifática	MOAM
N,N-Dimethylpalmitamide	C ₁₈ H ₃₇ N	Alifática	MOP - MOAM
N-Dodecylmethylamine	C ₁₃ H ₂₉ N	Alifática	MOP - MOAM

Continue

Continuation			
Compostos orgânicos	Fórmula molecular	Cadeia carbônica	Fração da MOS
Nonadecanamide	C ₁₉ H ₃₉ NO	Alifática	MOAM
Octadecanamide	C ₁₈ H ₃₇ NO	Alifática	MOP - MOAM
Octanamide, N,N-dimethyl-	C ₁₀ H ₂₁ NO	Alifática	MOP
Oleanitrile	C ₁₈ H ₃₃ N	Alifática	MOP - MOAM
Piperidine, 1,1'-methylenebis-	C ₁₁ H ₂₂ N ₂	Alicíclica	MOAM
Stearyltrimethylammonium chloride	C ₂₁ H ₄₆ ClN	Alifática	MOAM
Tetradecanamide	C ₁₄ H ₂₉ NO	Alifática	MOP - MOAM
Outros (Others)			
1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-methylpropyl) ester	C ₁₆ H ₂₂ O ₄	Aromática	MOP - MOAM
1,2-Benzenedicarboxylic acid, diisononyl ester	C ₂₆ H ₄₂ O ₄	Aromática	MOP
1,2-Benzenedicarboxylic acid, dinonyl ester	C ₂₆ H ₄₂ O ₄	Aromática	MOP
1,2-Oxathiane, 6-dodecyl-, 2,2-dioxide	C ₁₆ H ₃₂ O ₃ S	Alicíclica	MOP
13-Oxabicyclo[10.1.0]tridecane	C ₁₂ H ₂₂ O	Alicíclica	MOAM
2(3H)-Furanone, dihydro-5-tetradecyl-	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	Alicíclica	MOAM
2,2,4-Trimethyl-1,3-pentanediol diisobutyrate	C ₁₆ H ₃₀ O ₄	Alicíclica	MOP
2',4'-Dimethoxyacetophenone	C ₁₀ H ₁₂ O ₃	Aromática	MOAM
2,6-Di-tert-butyl-4-methylene-2,5-cyclohexadienone	C ₁₅ H ₂₂ O	Alifática	MOP
2-Dodecenal	C ₁₂ H ₂₂ O	Alifática	MOP
3,3-Dimethyl-dihydro-furan-2,5-dione or 2,2-Dimethylsuccinic anhydride	C ₆ H ₈ O ₃	Alicíclica	MOP - MOAM
7,9-Di-tert-butyl-1-oxaspiro(4,5)deca-6,9-diene-2,8-dione	C ₁₇ H ₂₄ O ₃	Alicíclica	MOP
7-Hexadecenal, (Z)-	C ₁₆ H ₃₀ O	Alifática	MOAM
9-Octadecen-1-ol, (Z)-	C ₁₈ H ₃₆ O	Alifática	MOAM
9-octadecenoic acid, 2,2,2-trifluoroethyl ester	C ₂₀ H ₃₅ F ₃ O ₂	Alifática	MOP - MOAM
Benzenepropanoic acid, 3,5-bis(1,1-dimethylethyl)-4-hydroxy-, octadecyl ester	C ₁₈ H ₂₈ O ₃	Aromática	MOP - MOAM
Bis(2-ethylhexyl) phthalate	C ₂₄ H ₃₈ O ₄	Aromática	MOP - MOAM
Cyclopentadecanone, 2-hydroxy-	C ₁₅ H ₂₈ O ₂	Alifática	MOP - MOAM
Decane, 1-iodo-	C ₁₀ H ₂₁ I	Alifática	MOP - MOAM
Diethyl Phthalate	C ₁₂ H ₁₄ O ₄	Aromática	MOP - MOAM
Di-n-octyl phthalate	C ₂₄ H ₃₈ O ₄	Aromática	MOP
Ditetradecyl ether	C ₂₈ H ₅₈ O	Alifática	MOAM
Docosyl trifluoroacetate	C ₂₄ H ₄₅ F ₃ O ₂	Alifática	MOAM
Eicosyl pentafluoropropionate	C ₂₃ H ₄₁ F ₅ O ₂	Alifática	MOAM
Heptadecyl heptafluorobutyrate	C ₂₁ H ₃₅ F ₇ O ₂	Alifática	MOAM
Hexacosyl heptafluorobutyrate	C ₃₀ H ₅₃ F ₇ O ₂	Alifática	MOAM
Hexadecane, 1-iodo-	C ₁₆ H ₃₃ I	Alifática	MOAM
Hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) ester	C ₂₂ H ₄₂ O ₄	Alifática	MOP - MOAM
Hexanedioic acid, bis[2-(2-butoxyethoxy)ethyl] ester	C ₂₂ H ₄₂ O ₈	Alifática	MOP - MOAM
Octacosyl heptafluorobutyrate	C ₃₂ H ₅₇ F ₇ O ₂	Alifática	MOP
Oleoyl chloride	C ₁₈ H ₃₃ ClO	Alifática	MOP - MOAM
Oleyl alcohol, trifluoroacetate	C ₂₀ H ₃₅ F ₃ O ₂	Alifática	MOAM

Continue

			Conclusion
Compostos orgânicos	Fórmula molecular	Cadeia carbônica	Fração da MOS
Oxacycloheptadec-8-en-2-one, (8Z)	C ₁₆ H ₂₈ O ₂	Alifática	MOAM
Oxetane, 3,3-dimethyl-	C ₅ H ₁₀ O	Alifática	MOAM
Oxirane, heptadecyl-	C ₁₉ H ₃₈ O	Alicíclica	MOP - MOAM
Oxirane, hexadecyl-	C ₁₈ H ₃₆ O	Alicíclica	MOP - MOAM
Sulfurous acid, octadecyl 2-propyl ester	C ₂₁ H ₄₄ O ₃ S	Alifática	MOP
Tetracosyl pentafluoropropionate	C ₂₇ H ₄₉ F ₅ O ₂	Alifática	MOP
Tetradecanal	C ₁₄ H ₂₈ O	Alifática	MOAM
Tetradecyl trifluoroacetate	C ₁₆ H ₂₉ F ₃ O ₂	Alifática	MOAM
Tetrapentacontane, 1,54-dibromo-	C ₅₄ H ₁₀₈ Br ₂	Alifática	MOP - MOAM
Tetratriacontyl heptafluorobutyrate	C ₃₈ H ₆₉ F ₇ O ₂	Alifática	MOAM
Triacontyl pentafluoropropionate	C ₃₃ H ₆₁ F ₅ O ₂	Alifática	MOAM
Tricosyl trifluoroacetate	C ₂₅ H ₄₇ F ₃ O ₂	Alifática	MOAM
Undecanal, 2-methyl-	C ₁₂ H ₂₄ O	Alifática	MOAM

FONTE: Elaboração própria (2025).